

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA NA PRIMJERU GRAĐEVNE JAME
VELIKOGORIČKA**
Diplomski rad

Fran Stopić

R137

Zagreb, 2017

ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA NA PRIMJERU GRAĐEVNE JAME VELIKOGORIČKA

Fran Stopić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Građevna jama mora biti sigurna i dostupna za rad ljudima i strojevima. Izbor odgovarajućeg rješenja izvedbe građevne jame ovisi o budućem građevinskom objektu, karakteristikama terena, prisutnosti podzemne vode te ostalim uvjetima okoline. Zaštitom građevne jame potrebno je osigurati stabilnost vertikalnih stranica građevne jame te prodiranje podzemne vode u slobodni prostor iskopa. U današnje vrijeme standardni dio geotehničkog projekta modeliranje je u računalnim programima, najčešće numeričkim metodama konačnih elemenata i konačnih razlika. Proračunom se dolazi do optimalnih sigurnosnih te ekonomski opravdanih rješenja izvedbi.

Ključne riječi: građevna jama, stabilnost, modeliranje, numeričke metode, Plaxis, FLAC

Završni rad sadrži: 40 stranice, 8 tablica, 31 slika i 7 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Dr.sc. Karolina Gradiški, postdoktorand

Ocjenjivači: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

STRESS AND DEFORMATION ANALYSIS ON THE VELIKOGORIČKA EXCAVATION PIT
EXAMPLE

Fran Stopić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Mining and Geotechnical Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The excavation pit has to be safe and accessible to people and machinery. The choice of an appropriate solution for construction of an excavation pit depends on the future building, terrain characteristics, presence of groundwater and other conditions. Stability of the excavation pit depends mainly on the stability of the vertical walls of the excavation pit and the groundwater seepage into the free excavation area. Nowadays, modeling in computer programs is the standard segment of the geotechnical project, using mostly finite element method and finite difference numerical method. Numerical calculation provides optimum security and economically feasible performance solutions prior to excavation.

Keywords: foundation pit, stability, modeling, numerical methods, Plaxis, FLAC

Thesis contains: 40 pages, 8 tables, 31 figures, 7 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Dubravko Domitrović, Assistant professor

Tech. assistance: PhD Karolina Gradiški

Reviewers: PhD Dubravko Domitrović, Assistant professor
PhD Želimir Veinović, Assistant professor
PhD Vinko Škrlec, Assistant professor

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O GRAĐEVNIM JAMAMA.....	2
2.1. Plitke građevne jame.....	3
2.1.1. Građevne jame širokog iskopa.....	3
2.2. Građevne jame s elementima podgrade.....	4
2.3. Stabilnost građevnih jama prema Eurokodu 7 (ULS i SLS).....	6
2.3.1. Granično stanje nosivosti.....	7
2.3.2. Granično stanje uporabivosti.....	7
2.4. Vrste zaštite građevnih jama.....	8
2.4.1. Vrste zaštite građevnih jama širih razmjera.....	8
2.4.2. Zagatne stijene.....	8
2.4.2.1. Čelično žmurje (talpe).....	9
2.4.2.2. Dijafragme.....	10
3. PRIMJER GRAĐEVNE JAME VELIKOGORIČKA.....	11
3.1. Geotehnički istražni radovi.....	11
3.1.1. Podzemna voda.....	13
3.2. Zaštitni konstrukcijski elementi i metoda izvedbe.....	13
3.2.1. Tok izvedbe.....	15
4. GEOSTATIČKA ANALIZA ZAŠTITNE KONSTRUKCIJE.....	16
4.1. Modeliranje u geotehnici.....	16
4.2. Proračun građevne jame Velikogorička u Plaxisu.....	17
4.2.1. Model tla.....	17
4.3. Proračun građevne jame Velikogorička u FLAC-u.....	19
4.3.1. Modeliranje.....	19
4.3.1.1. 1. faza: Početno stanje.....	20
4.3.1.2. 2. faza: Ugradnja čeličnog žmurja.....	22
4.3.1.3. 3. faza: Zadavanje dodatnog opterećenja.....	23
4.3.1.4. 4. faza: Iskop sloja pijeska.....	24
4.3.1.5. 5. faza: Iskop sloja šljunka do prvog reda geotehničkih sidara.....	26
4.3.1.6. 6. faza: Ugradnja prvog reda geotehničkih sidara.....	27
4.3.1.7. 7. faza: Iskop sloja šljunka do drugog reda geotehničkih sidara.....	29
4.3.1.8. 8. faza: Ugradnja drugog reda geotehničkih sidara.....	31

4.3.1.9.	9. faza: Iskop sloja šljunka do dna građevne jame.....	33
5.	USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA U PLAXISU I FLAC-U	35
6.	ZAKLJUČAK.....	39
7.	LITERATURA:	40

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Plitka građevna jama (Nonveiller, 1979)	3
Slika 2-2 Građevne jame širokog iskopa, (a) građevna jama iznad razine podzemne vode, (b) djelomično ispod razine podzemne vode (Nonveiller, 1979)	4
Slika 2-3 Primjer razuprte građevne jame (http://www.irgo.si)	5
Slika 2-4 Tipovi čeličnih platnica: (a) Hoesch, (b) Larssen, (c) Peine (Nonveiller, 1979) .	10
Slika 3-1 Shema sidrenja iza aktivnog klina.....	14
Slika 4-1 Geotehnički model u Plaxisu (Bošković, 2013).....	18
Slika 4-2 Prikaz geometrije modela.....	20
Slika 4-3 Unos parametara za sloj pijeska	21
Slika 4-4 Unos parametara za sloj šljunka.....	21
Slika 4-5 Prva faza modeliranja.....	22
Slika 4-6 Unos parametara čeličnog žmurja	23
Slika 4-7 Treća faza modeliranja	23
Slika 4-8 Četvrta faza modeliranja	24
Slika 4-9 Rezultati proračuna nakon četvrte faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	25
Slika 4-10 Peta faza modeliranja	26
Slika 4-11 Rezultati proračuna nakon pete faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	26
Slika 4-12 Šesta faza modeliranja.....	27
Slika 4-13 Rezultati proračuna nakon šeste faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	28
Slika 4-14 Aksijalna sila u sidru	29
Slika 4-15 Sedma faza modeliranja	29
Slika 4-16 Rezultati proračuna nakon sedme faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	30
Slika 4-17 Aksijalna sila u sidru	31
Slika 4-18 Osma faza modeliranja.....	31
Slika 4-19 Rezultati proračuna nakon osme faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	32
Slika 4-20 Aksijalne sile u sidrima	32
Slika 4-21 Deveta faza modeliranja.....	33

Slika 4-22 Rezultati proračuna nakon završne faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja	34
Slika 4-23 Aksijalne sile u sidrima	34
Slika 5-1 Dijagrami momenata savijanja.....	36
Slika 5-2 Dijagrami unutarnjih aksijalnih sila zagata	36
Slika 5-3 Dijagrami unutarnjih poprečnih sila zagata.....	37

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Uvjeti rada i metode izvođenja građevnih jama (Nonveiller, 1979)	2
Tablica 3-1 Opis materijala svrstanih u grupe (Geokon Zagreb, 2011)	12
Tablica 3-2 Parametri materijala tla potrebnih za modeliranje (Geokon Zagreb, 2011)	12
Tablica 3-3 Rezultati mjerenja podzemne vode u bušotinama (Geokon Zagreb, 2011)	13
Tablica 4-1 Obilježja materijala tla (Bošković, 2013).....	18
Tablica 4-2 Parametri tla za proračun u FLAC-u	20
Tablica 5-1 Tablični prikaz dobivenih unutrašnjih sila zagata	35
Tablica 5-2 Tablični prikaz proračunatih unutrašnjih aksijalnih sila sidara	38

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_s	-	faktor sigurnosti
D_c	m	kritična dubina
c		kohezija
γ_{unsat}	kN/m^3	nesaturirana jedinična težina tla
γ_{sat}	kN/m^3	saturirana jedinična težina tla
K_A	-	koeficijent aktivnog pritiska
$\text{tg}\theta$	-	tangens kuta unutrašnjeg trenja
k		koeficijent vodopropusnosti
γ	kN/m^3	jedinična težina tla
c'	Pa	efektivna kohezija
ϕ'	°	efektivni kut trenja
c_u	Pa	nedrenirana čvrstoća
q_u	kPa	jednoosna tlačna čvrstoća
L	m	dužina
E	kN/m^2	modul elastičnosti
ϕ	°	kut dilatacije
ν_{ur}	-	Poissonov koeficijent

1. UVOD

Građevnom jamom naziva se prostor unutar kojeg se izvode građevinski radovi. Taj prostor mora biti siguran za rad i dostupan ljudima i strojevima. Izbor najboljeg rješenja izvedbe građevinske jame ovisi o karakteristikama terena, podzemnoj vodi, budućem građevnom objektu te drugim utjecajima okoline. Zaštitom ili osiguranjem iskopa jame potrebno je spriječiti prodiranje vode u slobodni prostor njezina iskopa te osigurati stabilnost iskopanih stranica.

Svaka građevna jama koja se radi u složenijim uvjetima okoline, s utjecajem podzemne vode, u urbanima sredinama ili zahtjevnijim tlima, geotehnička je građevina za koju je potrebno izraditi projekt, kao i za svaku drugu građevinu. Projekt zaštite građevne jame je dokument u kojem se definira geotehnički model s rješenjem za prethodno definirani projektni zadatak.

Tema ovog diplomskog rada primjer je analize naprezanja i deformacija građevne jame Velikogorička, te usporedba izvedbe modela u dva programska paketa, Plaxisu metodom konačnih elemenata, te FLAC-u metodom konačnih razlika. U radu je za proračun odabran presjek zaštite građevne jame sa žmurjem visine 12 m i dva reda geotehničkih sidara.

2. OPĆENITO O GRAĐEVNIM JAMAMA

Građevne jame neizostavni su dio kod izgradnje temelja budućih objekata. Definiraju se kao prostori koji su pristupačni i sigurni za rad. Izbor odgovarajuće metode izgradnje građevne jame ovisi o mnogobrojnim faktorima koji utječu na sigurnost i mogućnost izvedbe. Uvjeti koje je potrebno uzeti u obzir su osobine materijala u kojem se radi, odnos dubine temelja i površine terena, te razina podzemne vode. U tablici 2-1 prikazane su metode izvođenja građevnih jama s obzirom na uvjete na području u kojem se radi.

Tablica 2-1 Uvjeti rada i metode izvođenja građevnih jama (Nonveiller, 1979)

Položaj vode	Materijal	Uvjeti za rad (iskop)		Crpljenje vode
		Neograničeni	Ograničeni	
Nivo vode ispod temeljne plohe	Koherentan	Iskop bez ograničenja	Vertikalne stijenske iskopa	Prema potrebi crpljenje kišnice iz jame
	Svi	Iskop s privremenim kosinama ($F_s = 1,2$)	Razupore, oplata	Prema potrebi crpljenje kišnice iz jame
Plitko ispod površine tla	Koherentno ili šljunak	Iskop s privremenim kosinama uz moguće strujanje niz kosinu	Razupore, oplata	Crpljenje kišnice i procjedne vode iz jame
	Pijesak	Iskop s privremenim kosinama ($F_s = 1,2$)	Razupore, oplata	Crpljenje iz bunara u ili oko jame
			Žmurje uz sprečavanje hidrauličkog sloma tla	Crpljenje iz jame
			Žmurje uz sprečavanje hidrauličkog sloma tla (kopanje pod vodom)	Nema
			Smrzavanje	Nema
Iznad površine tla	Tlo bez samaca	Zagati, otoci, bunari, kesoni	Plivajući sanduci, bunari, kesoni, zagati s ispunom	Iz jame između zagata
	Tlo sa samcima i stijena	Zagati, plivajući sanduci	Čelijski zagati	Iz jame između zagata

2.1. Plitke građevne jame

Plitke građevne jame koriste se za izradu drenaža i kanala. Izrada je moguća bez razupora u koherentnim materijalima, ali uz uvjet dubine koja je definirana kohezijom, jediničnom težinom tla, te koeficijentom aktivnog pritiska tla (Nonveiller, 1979):

$$D_c = \frac{2 \times c}{\gamma \times \sqrt{K_A}} \quad (2-1)$$

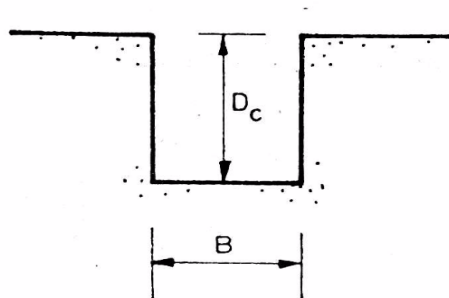
gdje su: D_c – kritična dubina

c – kohezija

γ – jedinična težina tla

K_A – koeficijent aktivnog pritiska tla.

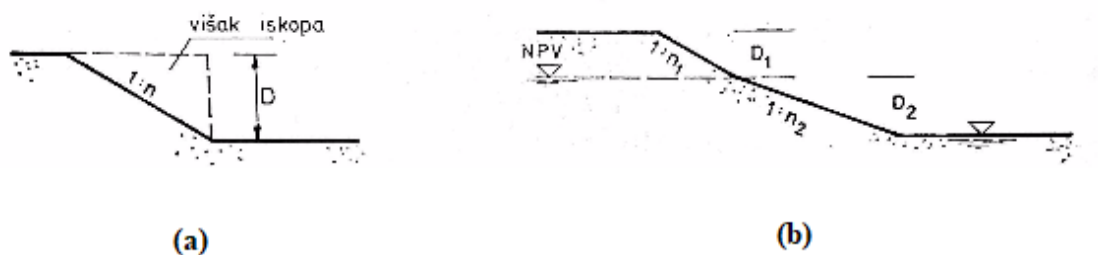
Dubina D_c naziva se kritičnom dubinom do koje je moguće kopati bez razupora. Kritičnu dubinu, odnosno granicu između plitkog i dubokog iskopa, reda veličine 6 m, odredili su Terzaghi i Peck 1967. godine. U homogenim glinovitim materijalima može se kopati i do dvostruke kritične dubine, ali preporučljivo je koristiti podgradu odnosno razupirati građevnu jamu. Na slici 2-1 prikazana je shema općenite plitke građevne jame.



Slika 2-1 Plitka građevna jama (Nonveiller, 1979)

2.1.1. Građevne jame širokog iskopa

Građevne jame širokog iskopa ulaze u kontekst plitkih građevnih jama. Pri izvedbi ne upotrebljavaju se dodatni elementi podgrade. Na slici 2-2 prikazane su skice građevnih jama širokih iskopa. Moguća je izrada kada je teren izrazito širok u odnosu na širinu budućih temelja. Pri izradi koriste se isključivo građevni strojevi.



Slika 2-2 Građevne jame širokog iskopa, (a) građevna jama iznad razine podzemne vode, (b) djelomično ispod razine podzemne vode (Nonveiller, 1979)

Na slici 2-2 (a) prikazana je shema građevne jame širokog iskopa iznad razine podzemne vode. Prema Nonveiller (1979) nagib kosine 1:n potrebno je dimenzionirati tako da minimalni faktor sigurnosti iznosi 1,2. Nagib kosine dimezionira se prema formuli:

$$\frac{1}{n} = \frac{tg\theta}{F_s} \quad (2-2)$$

gdje su: n – koeficijent nagiba

$tg\theta$ – tangens kuta unutarnjeg trenja

F_s – faktor sigurnosti.

Na slici 2-2 (b) prikaz je građevne jame širokog iskopa u kojoj je razina podzemne vode iznad dna iskopa građevne jame. U tom slučaj nagib kosine ispod razine podzemne vode mora biti blaži, te se računa prema formuli:

$$\frac{1}{n_2} = \frac{\gamma'}{\gamma} \times \frac{tg\theta}{F_s} \quad (2-3)$$

gdje su: n_2 – koeficijent nagiba

γ' – efektivna jedinična težina tla

γ – jedinična težina tla.

2.2. Građevne jame s elementima podgrade

U slučaju da je iskop građevne jame dublji od kritične dubine bez podgrade, ili je prostor na kojem se gradi ograničen, potrebno je koristiti elemente podgrade. Najjednostavniji elementi podgrade su razupore. Mogu biti vrlo jednostavne u obliku drvenih dasaka ili metalne izvedbe, postavljene horizontalno između stijenki bušotina. Primjer upotrebe razupora prikazan je na slici 2-3.



Slika 2-3 Primjer razuprte građevne jame (<http://www.irgo.si>)

Prikazanom izvedbom zaštite građevne jame drastično se utječe na mogućnost manevriranja unutar radnog prostora. S obzirom na potrebe iskopa u gradskim sredinama gdje okolina ne dopušta radnim strojevima kretanje izvan prostora iskopa, te su radni stojevi unutar radnog prostora, upotreba razupornih elemenata nije moguća. U tu svrhu koriste se vertikalni potporni elementi u obliku zagatnih stijena. Oblici zaštite dubokih građevnih jama opisani u nastavku rada, u poglavlju 2.4..

2.3. Stabilnost građevnih jama prema Eurokodu 7 (ULS i SLS)

Eurokod 7 (HRN EN 1997-1:2012) skup je pravila koje je potrebno pratiti prilikom izrade geotehničkog projekta, te normi koje budući objekt mora zadovoljiti. Dijeli se na dva dijela, prvi dio obuhvaća opća pravila kod geotehničkog projektiranja, dok se drugi dio odnosi na terenska i laboratorijska istraživanja.

U prvom dijelu, „Opća pravila“, uvode se 3 različita geotehnička razreda prema složenosti i rizičnosti konstrukcije:

- 1. kategorija – obuhvaća veličinom manje i jednostavnije građevine, te su potrebne uobičajene metode projektiranja i gradnje
- 2. kategorija – obuhvaća uobičajene građevine gdje nema posebne zahtjevnosti u odnosu na tlo i konstrukciju. Potrebno je odrediti i analizirati brojne geotehničke parametre u svrhu zadovoljenja fundamentalnih zahtjeva. Za razliku od prve kategorije, potrebna je izvedba terenskih i laboratorijskih ispitivanja.
- 3. kategorija – obuhvaća konstrukcije koje su izvan 1. i 2. kategorije, te zahtijeva složene metode projektiranja i izvedbe.

Prilikom geotehničkog projektiranja potrebno je analitički, iskustveno, modeliranjem, te opažanjem, zadovoljiti uvjete graničnog stanja nosivosti (ULS), te uporabivosti (SLS).

Izvedbom formule iz prijašnjih proračuna stanja sigurnosti, dolazi se do jednadžbe stanja sigurnosti konstrukcije koja se upotrebljava danas. Jednadžba sigurnosti konstrukcije glasi:

$$\gamma_S \times S \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (2-4)$$

Gdje su: γ_S – parcijalni koeficijent sigurnosti djelovanja

S – vanjski utjecaj

R – otpornost

γ_R – parcijalni koeficijent sigurnosti otpora

Analitičkom metodom određuju se reprezentativne karakteristične i projektne vrijednosti parametara tla, opterećenja i geometrijskih veličina. Projektne vrijednosti određuju se korekcijom karakterističnih vrijednosti parcijalnim faktorima.

2.3.1. Granično stanje nosivosti

Granično stanje nosivosti stanje je koje može izazvati rušenje konstrukcije. U stanja nosivosti spadaju:

- STR – unutarnji slom ili velike deformacije dijelova konstrukcije, uz bitan utjecaj čvrstoće materijala konstrukcije na otpornost
- GEO – slom ili deformacija tla
- EQU – gubitak ravnoteže objekta
- UPL – gubitak utjecaja ravnoteže konstrukcije i tla zbog sila uzgona
- HYD – bujanje tla ili erozija pod utjecajem hidrauličkih gradijenata

U proračunu graničnog stanja nosivosti potrebno je zadovoljiti uvjet graničnog stanja sloma i graničnog stanja statičke ravnoteže. Granično stanje sloma zadovoljeno je kada je proračunska vrijednost djelovanja S_D manja ili jednaka proračunskoj vrijednosti nosivosti R_D , $S_D \leq R_D$. Proračunska vrijednost nosivosti izvodi se iz parametara materijala. Granično stanje ravnoteže zadovoljeno je kad je vrijednost destabilizirajućeg djelovanja manja ili jednaka od proračunske vrijednosti stabilizirajućeg faktora.

2.3.2. Granično stanje uporabivosti

Granična stanja uporabivosti određeni su kriteriji za normalnu upotrebu konstrukcija:

- Granično stanje naprezanja
- Granično stanje trajnosti
- Granično stanje deformiranja
- Granično stanje vibracija

Granično stanje uporabivosti zadovoljeno je kada je rezultatna proračunska vrijednost djelovanja manja ili jednaka od granične računске vrijednosti kriterija uporabivosti; naprezanja, trajnosti, deformacije ili vibracije.

2.4. Vrste zaštite građevnih jama

Građevne jame privremeni su prostori koji služe pri izgradnji temelja budućih građevinskih objekata. U prijašnjim poglavljima navedeni su utjecaji na moguće urušavanje te određeni parametri koje je potrebno zadovoljiti kako do toga nebi došlo. Kako je ranije navedeno, pri izgradnji plitkih građevnih jama nisu potrebne nikakve mjere zaštite kao i u slučaju vrlo širokog prostora u kojem se može raditi pokos normiranog nagiba.

U slučaju kada je potrebno izgraditi usku, duboku građevnu jamu, koriste se razupore. Razupore su drvene ili metalne grede ugrađene horizontalno između dvije nasuprotne stijenske građevne jame. Na stijenske građevne jame potrebno je ugraditi metalne oplata koje imaju oblik noža na dnu kako bi prodrijele u tlo. U slučaju da je jama značajne dubine, iskop i postavljanje oplata i razupora odvija se u fazama.

2.4.1. Vrste zaštite građevnih jama širih razmjera

Pri izgradnji temelja građevnih objekata veći razmjera, potrebna je izgradnja i većih građevnih jama. U navedenom slučaju upotreba razupora nije moguća iz više razloga, ali najistaknutiji razlog jest manevarski prostor radnih strojeva.

U slučaju kada ne postoji mogućnost upotrebe razupora potrebno je u potpunosti osigurati prostor građevne jame „oplatom“. Postoje mnogobrojni načini izvedbe potpornih konstrukcija u svrhu zaštite građevne jame, te će u nastavku biti navedeni općeniti standardni načini koji uključuju razne vrste zagatnih stijena, sidrene konstrukcije, te također kombinacije koje uključuju izgradnju uz pomoć pokosa.

2.4.2. Zagatne stijene

„Zagatna je stijena vitka vertikalna građevinska konstrukcija zabijena u tlo ili u njemu izgrađena. Ona preuzima pritisak tla i osigurava stabilnost vertikalne stijene, a nekad služi za zaštitu od podzemne vode.“(Nonveiller, 1979)

Pri projektiranju ovih geotehničkih konstrukcija bitno je odrediti potrebnu dubinu zabijanja, te način pridržanja uzimajući u obzir sva djelovanja i utjecajne faktore iz okoline (U.S. Army Corps of Engineers, 1994):

- Aktivni pritisak materijala iza stijene i pasivni otpor materijala ispred stijene,
- Hidrostatki tlak ispred stijene, te hidrostatki tlak i uzgon vode iza zagata,
- Pritisak dodatnog opterećenja na površini iza stijene,
- Ostale vanjske sile koje utječu izrvano na stijenu.

Dubinu zabijanja i dimenzije zagata potrebno je uskladiti s zahtjevima krutosti, te ocijeniti deformacije u okolini tijekom svih faza izvedbe projekta.

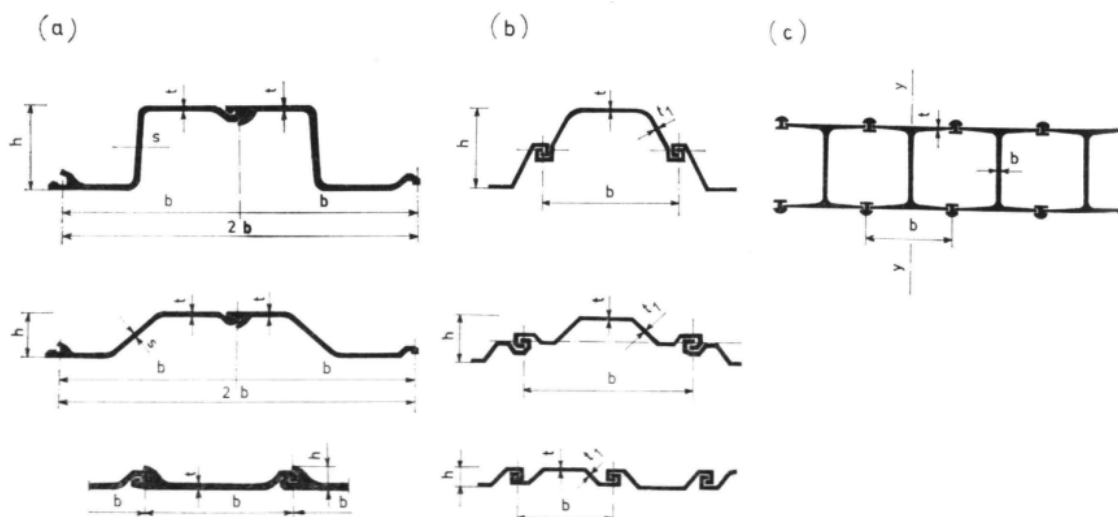
Zagati se mogu izvesti u drvu, čeliku, te armiranu betonu. Drvo danas više nije u upotrebi radi visoke cijene u odnosu na razinu efikasnosti. Čelik je zbog svoje značajne elastičnosti i čvrstoće često upotrebljavan za izradu talpi. Vrlo vitke čelične konstrukcije mogu biti vrlo iskoristive pri izradi različitih zagata u različitim uvjetima zbog mnogih različito dizajniranih platnica ovisno o uvjetima u kojima se radi. Različite vrste ovisno o namjeni detaljnije će biti opisane u nastavku. Za razliku od čeličnih platnica, prema Nonveiller (1979), armiranobetonske platnice namijenjene su samo za izradu trajnih građevina. One imaju prednost pred drugim tipovima jer su manje osjetljive na razne agresivne utjecaje, ako je beton valjano pripremljen i ugrađen. Ponekad su izvedeni zagati od armiranih betonskih talpa s čeličnim bravama koje su ugrađene u pojedine platnice. Na taj način moguće ih je besprijekorno voditi i međusobno sljubiti jednako kao i kod čeličnih platnica (Nonveiller, 1979).

Dvije su najčešće izvedbe zagata koje se koriste, žmurje (talpe), te dijafragme, čija izvedba će biti opisana u nastavku.

2.4.2.1. Čelično žmurje (talpe)

Zagati od čeličnog žmurja često su upotrebljavana opcija kod izrade građevnih jama. Mogu se koristiti kao privremene, ali i trajno rješenje pri temeljenju budućeg građevinskog objekta. Odlikuju ih visoki otpori jakim pritiscima, znatna vodonepropusnost, te jednostavnost produživanja zida prema potrebi. Također jedna od prednosti je jednostavnost instalacije zabijanjem u dno građevne jame.

Postoje različite talpe izrađene od različitih proizvođača, te je izbor raznolik ovisno o namjeni i uvjetima u kojima se radi. Međutim postoji par osnovnih tipova prema kojima se dizajniraju sve talpe prikazanih na slici 2-4.



Slika 2-4 Tipovi čeličnih platnica: (a) Hoesch, (b) Larssen, (c) Peine (Nonveiller, 1979)

Talpe, radi svoje vitkosti, imaju tendenciju deformacije te odmaka od stijenke građevne jame pri površini iza zagatnog zida. Iz tog razloga potrebno je dobro projektirati ovakvu građevnu jamu i njene elemente, te raditi konstantni monitoring deformacija. Također, talpe se vrlo često razupiru, te sidre.

2.4.2.2. Dijafragme

Dijafragma je kontinuirana armiranobetonska potporna konstrukcija za zaštitu građevne jame. Dijafragma izrađena u tlu treba sigurno podnositi aktivni pritisak okolnog tla, te kod prisutnosti podzemnih voda hidrostatiki tlak. Aktivna horizontalna naprezanja preuzimaju sidra ili razupore. Dijafragme se izrađuju uzastopnim elementima širine 5 do 8 metara na način da se prvo ugrađuju neparni elementi, a zatim parni. Ovim načinom izrade parni elementi u potpunosti prijanjaju za već gotove, neparne, elemente dijafragme, te se postiže potpuna nepropusnost i kontinuitet zaštitne konstrukcije. U dijafragmu je također moguće ugraditi košare čelične armature u slučaju potrebe preuzimanja momenata savijanja.

Prednost dijafragmi je dubina na kojoj se mogu koristiti pri izradi građevnih jama, te apsolutna nepropusnost. Iz tog razloga najčešća je upotreba dijafragmi pri radovima u gradskim središtima gdje je ponekad potrebna iznimna dubina konstrukcije (metro, podzemne garaže), a širina prostora u kojem se radi vrlo je ograničena.

3. PRIMJER GRAĐEVNE JAME VELIKOGORIČKA

Predmetni objekt nalazi se u Velikogoričkoj ulici u Zagrebu, na katastarskoj čestici br. 711/3, katastarski operat Žitnjak. Građevna čestica formirana je u površini od 7 087,00 m². Podzemni dio građevine pravokutnog je tlocrtnog oblika. Dimenzija 45,5 x 57,0 m. Kota nule građevinskog objekta na nivou je razine površine tla (112,44 m.n.v.), te dubina ukopavanja objekta za izvedbu podzemnih etaža, te debljinu temelja, iznosi ukupno 9,26 m. Debljina temeljne ploče iznosi 0,6 m. (Geokon Zagreb., 2011)

3.1. Geotehnički istražni radovi

Geotehnički istražni radovi izvedeni su za potrebe projektiranja i izgradnje predmetnog građevnog objekta. Istražni radovi sastojali su se od terenskih i laboratorijskih ispitivanja tla. Svrha izvedenih radova određivanje je parametara tla koji će nadalje biti upotrijebljeni pri izradi modela buduće građevne jame. (Geokon Zagreb, 2011)

Terenski istražni radovi uključivali su:

- Istražno bušenje (4 istražne bušotine 10 do 22 m dubine), te klasifikaciju bušaće jezgre,
- Uzorkovanje poremećenih uzoraka,
- Standardni penetracijski pokus.

In situ klasifikacija i identifikacija tla služi za odabir mjerodavnih uzoraka tla, te za odabir metoda laboratorijskih ispitivanja uzoraka.

U geomehničkom laboratoriju izvedena su laboratorijska ispitivanja poremećenih uzoraka tla:

- Prirodni sadržaj vlage w_0 ,
- Atterbergove granice plastičnih stanja w_L, w_P ,
- Granulometrijski sastav.

Sva ispitivanja provedena su u skladu s normama (HRN ISO/IEC i ASTM).

Rezultati dobiveni geotehničkim istražnim radovima sistematizirani su u tablici 3-1 prema vrsti i opisu materijala na određenoj dubini.

Tablica 3-1 Opis materijala svrstanih u grupe (Geokon Zagreb, 2011)

Grupa materijala	Vrsta materijala	Oznaka materijala	Opis materijala
(1)	NASIP	N	Nasip se sastoji od kamenog drobljenca, pijeska i gline. Registriran je u svim bušotinama debljine sloja od 0,10 do 1,00 m.
(2)	GLINA SREDNJE I VISOKE PLASTIČNOSTI	CI, CH	Glina je srednje i visoke plastičnosti, kruto plastične konzistencije, smeđe boje, prašnasta i pjeskovita. Glina je registrirana u svim bušotinama ispod sloja nasipa, najpliće do 1,50 a najdublje do 3,10 m od površine terena. Broj udaraca standardnog penetracijskog testa (SPT-a) je N=9 udaraca/30 cm. $I_c=0,92$ do 1,22 (prosjek 1,02)
(3)	PIJESAK	SP, SC	Pijesak je sitan do srednje krupan, slabo gradiuran do zaglinjen, rastresit, smeđe boje. Pijesak je registriran u svim bušotinama debljine od 0,50 do 1,10 m. Broj udaraca standardnog penetracijskog testa (SPT-a) je N=7 do 10 udaraca/30 cm. Prosjek N=9 udaraca/30 cm. Vodopropusnost pijeska računata iz granulometrijske krivulje prema USBR-u se kreće od $k=10^{-3}$ (SP) do 10^{-6} (SC) cm/s.
(4)	ŠLJUNAK	GW, GP, GW-GC, GC	Šljunak je sitan do srednje krupan, dobro i slabo gradiuran do zaglinjen, srednje do vrlo zbijen, u manjoj mjeri rastresit, pjeskovit, smeđe boje. Šljunak je registriran u svim bušotinama do dubine bušenja Broj udaraca standardnog penetracijskog testa (SPT-a) je N=7 do >50 udaraca/30 cm. Prosjek N=28 udaraca/30 cm. Vodopropusnost pijeska računata iz granulometrijske krivulje prema USBR-u se kreće od $k=10^{-1}$ (GW, GP) do 10^{-4} cm/s (GC).

Na dubini na kojoj se odvija faza modeliranja projekta nalaze se slojevi pijeska i šljunka. Uzevši to u obzir, sloj nasipa i gline zanemarivi su, te će biti uklonjeni u toku projekta. U skladu s time u tablici 3-2 prikazani su parametri tla koje će biti u projektnom modelu.

Tablica 3-2 Parametri materijala tla potrebnih za modeliranje (Geokon Zagreb, 2011)

	NASIP GRUPA MATERIJALA (1)	GLINA GRUPA MATERIJALA (2)	PIJESAK GRUPA MATERIJALA (3)	ŠLJUNAK GRUPA MATERIJALA (4)
Jedinična težina γ (kN/m ³)	-	19	20	21
Efektivna kohezija c' (kPa)	-	18-20	0	0
Efektivni kut trenja ϕ' (°)	-	20-22	28-30	30-35
Nedrenirana čvrstoća c_u (kPa)	-	80-100	-	-
Jednoosna tlačna čvrstoća q_u (kPa)	-	-	-	-
SPT N (ud/30 cm)	-	9	7-10 (prosjek 9)	7 do >50 (prosjek 28)
Edometarski modul Ms (MPa)	-	4-6	6-8	20-30
Koef. vodopropusnost k (cm/s)	-	10^{-7} - 10^{-9}	10^{-3} – 10^{-6}	10^{-1} – 10^{-4}

3.1.1. Podzemna voda

Tijekom istražnih geotehničkih radova praćena je pojava podzemne vode, te su naknadno u bušotine ugrađeni piezometri u svrhu mjerenja razine podzemne vode. Interpretirani podaci dobiveni mjerenjima u piezometrima i u tijeku istražnih radova prikazani su u tablici 3-3.

Tablica 3-3 Rezultati mjerenja podzemne vode u bušotinama (Geokon Zagreb, 2011)

BUŠOTINA	KOTA UŠĆA BUŠOTINE (m n.m.)	POJAVA PODZEMNE VODE – PPV (m)	RAZINA PODZEMNE VODE – RPV (m)	RAZINA PODZEMNE VODE – RPV (m n. m.)	DATUM MJERENJA
S-024-11-01	112,30	9,00	Nakon bušenja ugrađen je piezometar		01.03.11.
S-024-11-02	112,30	7,00	9,00	103,25	04.03.11.
S-024-11-03	112,10	7,40	9,35	102,75	13.04.11
S-024-11-04	111,42	8,50	9,10	102,32	14.04.11
S-132-09-01	111,70	9,30	9,30	102,40	22.10.09.

Na mjerenje razine podzemne vode popriličan utjecaj imao je vodostaj rijeke Save koja se nalazi u blizini lokacije. Razina podzemne vode tijekom mjerenja znatno je varirala, te su zadnja mjerenja pokazala da je razina podzemne vode ispod dna buduće građevne jame, što ukazuje da nije potrebno dodatno zaštititi dno građevne jame od prodiranja. U slučaju porasta RPV radovi će morati biti obustavljeni na određeni period vremena, te je radove potrebno izvesti u suhom razdoblju godine.

3.2. Zaštitni konstrukcijski elementi i metoda izvedbe

Odabrano rješenje izgradnja je konstrukcije zaštite građevne jame čija je svrha osiguranje stabilnosti oboda građevne jame, te postojećih građevinskih objekata u okolini.

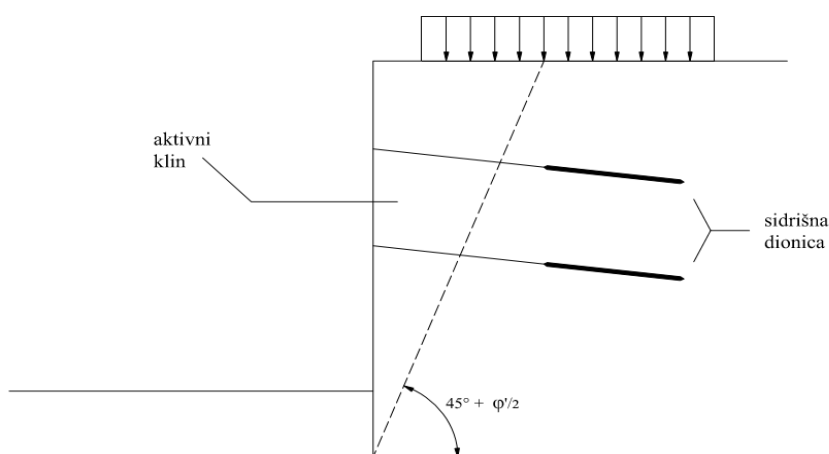
U ovom slučaju kao potporni elementi građevne jame odabrane su čelične talpe što ukazuje na privremeno rješenje zaštitne konstrukcije. Po završetku izgradnje nosivih zidova i temeljnih ploča, navedeni konstrukcijski elementi preuzet će u potpunosti ulogu nosivih elemenata konstrukcije.

S obzirom na sve navedene uvjete okoline i tla, uzak radni prostor te postojeće građevne objekte u blizini, odabrana su dva moguća tipa rješenja za nastavak proračuna u daljnjem tijeku projekta (Geokon Zagreb, 2011):

- Talpe – dužina profila L=12 m s dva reda prednapetih geotehničkih sidara
- Talpe – dužina profila L=10 m s jednim redom prednapetih geotehničkih sidara

Čelično žmurje upotrebljeno u svrhu proračuna i koje će biti u izvedbi zaštitne konstrukcije tipa je Larssen 43.

Povezivanje talpi postiže se ugradnjom UPN 220 profila u razini ugradnje geotehničkih sidara. Čelično žmurje izvodi se vibriranjem i/ili utiskivanjem s radnog platoa kotama 112 i 110,50 metara nadmorske visine. Sidrenje potporne konstrukcije izvodi se ugradnjom i prednapinjanjem geotehničkih sidara. Sidra se sastoje od snopova čeličnih sajli, te su projektirana kao privremena. Nakon ugradnje, sidra se prednapinju kako bi se smanjili pomaci i momenti savijanja u potpornoj konstrukciji, te da se smanje nepovoljne deformacije potpornih konstrukcija izazvanih relaksacijom naprezanja pri iskopu. Na slici 3-1 je prikazana shema ispravno odabrane dužine geotehničkih sidara obzirom na površinu aktivnog klina iza zida.



Slika 3-1 Shema sidrenja iza aktivnog klina

Ugradnja sidara mora biti iznimno precizna i oprezna. Nedopustivo je nastaviti iskop građevne jame prije nego je u potpunosti u funkciji cijeli red geotehničkih sidara.

Duljine odabranih sidara za iskop predmetne građevne jame su 13,5 m, od čega je 6,0 m predviđeno za sidrišnu dionicu. Sva predviđena sidra ugrađuju se pod nagibom od 10° . Redoslijed izvedbe sidara treba biti takav da se pri izvođenju ne oštećuje prethodno izvedeno sidro. (Geokon Zagreb, 2011)

3.2.1. Tok izvedbe

Terenski radovi iskopa građevne jame te svih potrebnih potpornih elemenata izvoditi će se u 10 stupnjeva:

- Utvrđivanje stanja susjednih infrastrukturnih objekata
- Uređenje radne površine
- Ugradnja opreme za tehničko promatranje
- Nulto mjerenje
- Ugradnja talpi
- Prva faza iskopa
- Ugradnja prvog reda geotehničkih sidara
- Druga faza iskopa
- Ugradnja drugog reda geotehničkih sidara
- Treća faza iskopa

Važno je napomenuti da se opremom za tehničko promatranje prate pomaci u svim fazama iskopa. Nakon završetka radova i potvrde o sigurnosti, sidra i talpe će se demontirati i ukloniti.

4. GEOSTATIČKA ANALIZA ZAŠTITNE KONSTRUKCIJE

4.1. Modeliranje u geotehnici

Numeričko modeliranje složen je postupak simulacije brojnih fizikalnih procesa. U geotehnici numeričkim modeliranjem simuliraju se inženjerski zahvati i procesi vezani uz tlo, te izradu objekata u tlu. U tu svrhu koriste se gotovi računalni programi, koji omogućavaju relativno brzi proračun te uvid u rezultate modeliranog procesa, kao i lake promjene strukture u slučaju potrebe. Proračunskim modelima potrebno je pristupiti s oprezom s obzirom na to da proračunski modeli rijetko prikazuju potpuno vjernu sliku ponašanja konstrukcije. Modele je potrebno smatrati i tretirati kakvi jesu, relativno grube aproksimacije te pojednostavljene realnosti postojećih situacija. Od upotrebe modela očekuje se ravnoteža kompleksnosti i pouzdanosti, te se zahtijeva obuhvatnost ponašanja konstrukcije znatnog utjecaja u promatranoj projektnoj situaciji.

Inicijalni projekt modeliran je u računalnom programu Plaxis 2D-V8 metodom konačnih elemenata (Bošković, 2013). Metoda konačnih elemenata evoluirala je iz mehaničko-strukturalnih analiza greda, rešetki i konzola. Kod metode konačnih elemenata potrebno je odrediti obuhvatno područje, odabrati oblik i broj elemenata, zadati čvorove te dodijeliti prigodne koordinate. Elemente je potrebno definirati ovisno o čvorovima. Konturni rubni uvjeti zadaju se deformacijama i naprezanjima. U slučaju da na određenim mjestima očekujemo povećanje koncentracije naprezanja, mreža elemenata se proglašuje.

U predmetnom radu korišten je programski paket FLAC 8.0. Geotehnički model izveden je metodom konačnih razlika. Metoda konačnih razlika najstarija je i najjednostavnija numerička metoda u geotehnici (Itasca, 2016). Zahtijeva poznavanje početnih i rubnih uvjeta. Rješenje modela postiže se diskretizacijom, koriste se kratki vremenski intervali u proračunu. Mrežne vrijednosti potrebno je generirati za svaki korak.

U konačnici, važno je napomenuti da su numeričke metode diskretizacije početnih modela, te aproksimacije konačnog ishoda. Iz tog razloga korisnik mora s oprezom i iskustvom koristiti podatke dobivene geotehničkim istražnim radovima, te s oprezom upotrijebiti konačne rezultate proračuna. U radu je za primjer proračuna naprezanja i deformacija odabran presjek zaštite građevne jame sa žmurjem visine 12 m i dva reda geotehničkih sidara.

4.2. Proračun građevne jame Velikogorička u Plaxisu

Dimenzioniranje predmetnog objekta izvedeno je računalnim programom Plaxis 2D-V8, metodom konačnih elemenata (Bošković, 2013). U Plaxisu su obavljani proračuni i analize stanja naprezanja te deformacija konstrukcije zaštite građevne jame. Mreža konačnih elemenata generirana je u trokutnim oblicima s 15 čvorova po elementu. Mreža elemenata dodatno se može progustiti na mjestima na kojima se očekuje povećanje koncentracije naprezanja, a to su područja ispod opterećenja, oko čeličnog žmurja te sidrišne dionice.

Dimenzioniranje i analiza izvode se u fazama u kojima će teći i izvedba građevne jame kako bi se osigurala stabilnost tokom cijelog projekta na terenu.

Proračun tako teče kroz 10 faza:

- 1. faza: početno opterećenje
- 2. faza: ugradnja čeličnog žmurja u tlo
- 3. faza: iskop građevne jame do razine 50 cm ispod kote prvog reda sidara
- 4. faza: ugradnja prvo reda geotehničkih sidara
- 5. faza: aktivacija prvog reda geotehničkih sidara
- 6. faza: iskop građevne jame do razine 50 cm ispod kote drugog reda sidara
- 7. faza: ugradnja drugog reda geotehničkih sidara
- 8. faza: aktivacija drugog reda geotehničkih sidara
- 9. faza: snižavanje razine podzemne vode
- 10. faza: iskop građevne jame do dna

4.2.1. Model tla

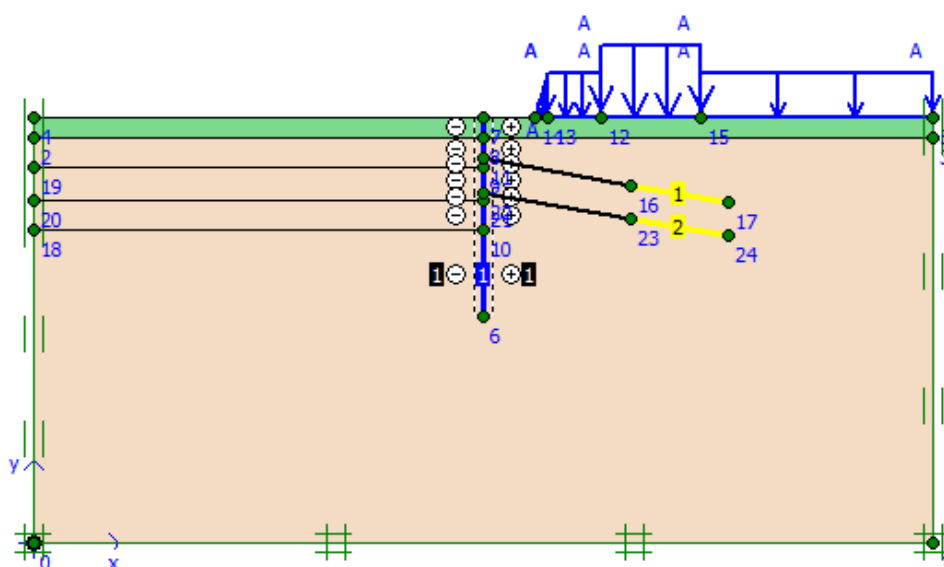
Model tla sastoji se od dvije vrste materijala, glinovitog pijeska i dobro do srednje graduiranog šljunka. Model je izrađen Hardening Soil modelom tla, te su proračunske vrijednosti parametara čvrstoće i krutosti temeljnog tla odabrane na temelju analize rezultata provedenih geotehničkih istražnih radova te empirijski. Odabrani materijali sa dobivenim parametrima prikazani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Obilježja materijala tla (Bošković, 2013)

Opis tla		Glinoviti pijesak	Šljunak
Oznaka tla		SC	GP-GW
dubina	[m]	1,8-2,9	$\geq 2,9$
Vrsta tla		drenirano	drenirano
γ_{unsat}	[kN/m ³]	20	21
γ_{sat}	[kN/m ³]	20	21
k_x	[m/dan]	$8,64 \cdot 10^{-3}$	8,64
k_y	[m/dan]	$8,64 \cdot 10^{-3}$	8,64
E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	6 000	20 000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	[kN/m ²]	6 000	20 000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	[kN/m ²]	30 000	100 000
c_{ref}	[kN/m ²]	0	0
φ	[°]	28	30
ϕ	[°]	0	0
v_{ur}	[-]	0,3	0,2

Vrh zida od čeličnog žmurja postavlja se na kotu površine terena 110,50 metara nadmorske visine, te se na površinu terena u modelu postavlja kontinuirano opterećenje u iznosu od 25 do 60 kN/m². Kao što je ranije navedeno potporna konstrukcija sidri se s dva reda geotehničkih sidara duljine 13,50 metara od čega 6,00 metara sidrišne dionice. Nagib geotehničkih sidara iznosi 10° od horizontalne ravnine, te je međusobni razmak 2,40 metara.

Na slici 4-1 prikazan je dovršeni model tla sa svim zadanim elementima potporne konstrukcije te unesenim parametrima tla.



Slika 4-1 Geotehnički model u Plaxisu (Bošković, 2013)

Na slici su vidljiva zadana kontinuirana opterećenja na površini tla, te raspored materijala u tlu. Glinoviti pijesak nalazi se na dubini do 2,90 metara, dok je na dubljim razinama dobro do srednje građirani šljunak.

4.3. Proračun građevne jame Velikogorička u FLAC-u

Kao što je ranije navedeno, računski program FLAC radi metodom konačnih razlika. Projektni zadatak izveden je 2D generiranom mrežom. Model tla generiran je u mreži 40 x 20 kvadratnih elemenata. „Beam“ elementom odijeljen je segment iskopa jame od stabilnog dijela s desne strane modela. Model je podijeljen u 6 segmenata, 4 koja predstavljaju faze otkopa materijala, 2 predstavljaju slojeve neotkopanog materijala s desne strane „beam“ elementa.

4.3.1. Modeliranje

Dimenzioniranje i proračun teku kroz korake. Kao što je ranije navedeno, u FLAC-u je potrebno generirati model za svaki korak posebno. U nastavku će svaki korak dimenzioniranja biti zasebno prikazan i interpretiran. Koraci dimenzioniranja prema fazama iskopa:

- 1. faza: Početno stanje
- 2. faza: Ugradnja čeličnog žmurja
- 3. faza: Zadavanje dodatnog opterećenja
- 4. faza: Iskop sloja pijeska
- 5. faza: Iskop sloja šljunka do prvog reda geotehničkih sidara
- 6. faza: Ugradnja prvog reda geotehničkih sidara
- 7. faza: Iskop sloja šljunka do drugog reda geotehničkih sidara
- 8. faza: Ugradnja drugog reda geotehničkih sidara
- 9. faza: Iskop sloja šljunka do dna građevne jame

4.3.1.1. 1. faza: Početno stanje

Izrada modela u računalnom programu započinje se geometrijom. Zadaju se koordinate rubnih točaka 2D modela te se generira mreža. Generira se mreža reda veličine 200 x 33 elemenata kvadratnog oblika. Nakon zadavanja vanjskih, zadaju se unutarnja geometrijska obilježja modela. S obzirom na zadanu dubinu slojeva, te kasnije dubine otkopa do određenih dubina, određuju se koordinate unutarnjih točaka modela kako bi generirani model bio spreman za daljnje faze proračuna. S desne strane modela ostavljen je dovoljan prostor za generiranje geotehničkih sidara u kasnijim fazama proračuna.

Na slici 4-2 prikazan je geometrijski model predmetnog rada.



Slika 4-2 Prikaz geometrije modela

Nakon zadavanja geometrije, modelu se pridodaju vrijednosti parametara vode, gravitacijske sile, te parametri materijala tla. U tablici 4-2 prikaz je potrebnih parametara tla u svrhu daljnjeg proračuna. Za tlo je odabran Mohr-Coulombov model.

Tablica 4-2 Parametri tla za proračun u FLAC-u

Vrsta materijala	Glinoviti pijesak	Šljunak
Gustoća materijala [kg/m^3]	2000	2100
Modul elastičnosti [Pa]	6000000	20000000
Poissonov koeficijent	0,3	0,2
Kohezija [Pa]	0	0
Vlačna čvrstoća [Pa]	0	0
Kut unutrašnjeg trenja [$^\circ$]	28	30
Kut dilatacije [$^\circ$]	0	0

Prikaz dodijeljenih parametara tla prikazan je na slici 4-3 za sloj glinovitog pijeska, te na slici 4-4 za sloj šljunka.

The screenshot shows the 'Class Tlo' dialog box for 'Glinoviti pijesak (SC)'. The 'Model' section has 'Mohr-Coulomb' selected. The 'Mass-Density' is 2000 [kg/m³]. Under 'Elastic Properties', 'Bulk modulus' is SE6, 'Shear modulus' is 2.307692E6, 'Elastic modulus' is 6000000, and 'Poisson's ratio' is 0.3. Under 'Plastic Properties', 'Cohesion' and 'Tension' are 0.0. Under 'Angles: (Degrees)', 'Friction angle' is 28 and 'Dilation angle' is 0.0. Under 'Joint Properties', all values (Joint angle, JCohesion, JTension, JFriction angle, JDilation angle) are 0.0. Buttons 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

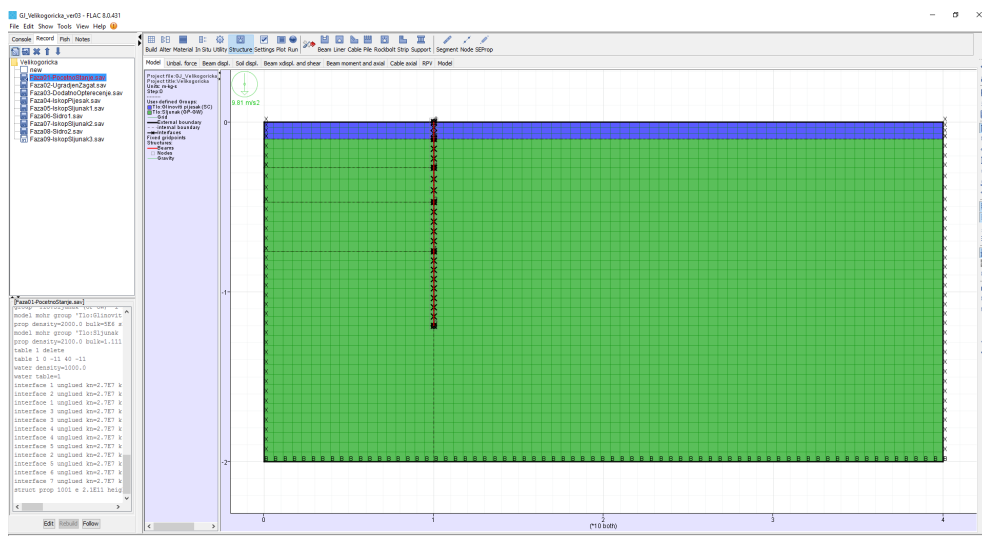
Slika 4-3 Unos parametara za sloj pijeska

The screenshot shows the 'Class Tlo' dialog box for 'Šljunak (GP-GW)'. The 'Model' section has 'Mohr-Coulomb' selected. The 'Mass-Density' is 2100 [kg/m³]. Under 'Elastic Properties', 'Bulk modulus' is 1.111111E7, 'Shear modulus' is 8.333333E6, 'Elastic modulus' is 20000000, and 'Poisson's ratio' is 0.2. Under 'Plastic Properties', 'Cohesion' and 'Tension' are 0.0. Under 'Angles: (Degrees)', 'Friction angle' is 30 and 'Dilation angle' is 0.0. Under 'Joint Properties', all values (Joint angle, JCohesion, JTension, JFriction angle, JDilation angle) are 0.0. Buttons 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

Slika 4-4 Unos parametara za sloj šljunka

Pridodavanju parametara tla slijedi dodjela parametara interface-a između zagata i tla. Normalna kontaktna čvrstoća i posmik sloja pijeska i čeličnog žmurja iznosi $2,7 \times 10^7$ Pa/m², dok je vrijednost kuta unutrašnjeg trenja 28°. Važno je napomenuti da neovisno o tome što je zagatni zid geometrijski već zadan u modelu, vrijednost njegove gustoće jednaka je nuli, te time ne utječe na rezultate proračuna prve faze.

Nakon svih spomenutih koraka dobiven je konačan ishod modeliranja prve faze. Prikaz dobivenog modela prikazan je na slici 4-5

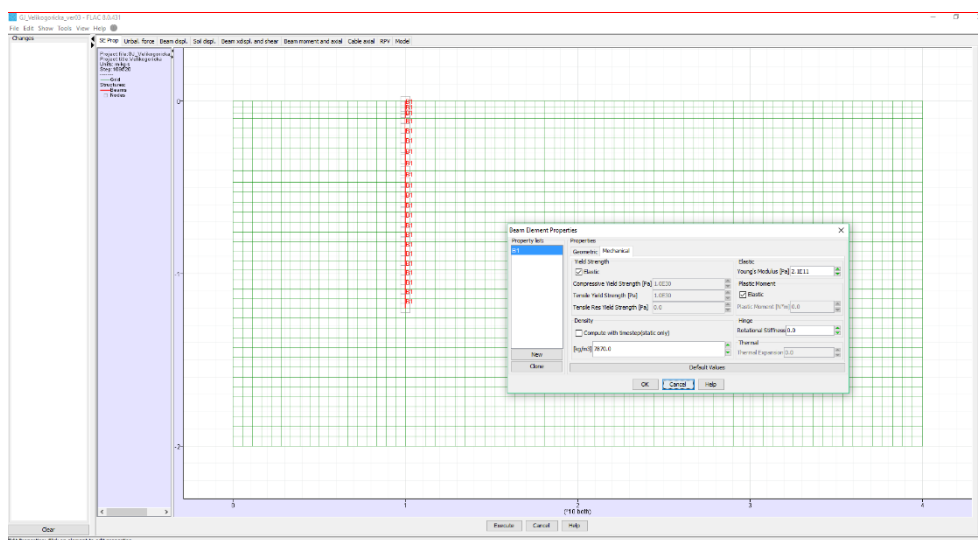


Slika 4-5 Prva faza modeliranja

4.3.1.2. 2. faza: Ugradnja čeličnog žmurja

Po završetku prve faze u kojoj je generirana mreža u cijelosti te su zadani parametri tla i unesene koordinate zagata, započinje se s proračunom druge faze. U prvoj fazi zagatnoj stijeni zadana su samo geometrijska obilježja bez potrebnih svojstva za nastavak proračuna. U sljedećem koraku prirodana su svojstva zagata prema predmetnom projektu. Zagatna stijena koja se koristi tipa je Larssen 43. Materijal od kojeg se izrađuje zagat niskougljični je čelik, to jest konstrukcijski čelik. U skladu s time u FLAC-u se zagatu pridodaje gustoća u vrijednosti $7870,0 \text{ kg/m}^3$ te Youngov modul elastičnosti reda veličine 210 GPa.

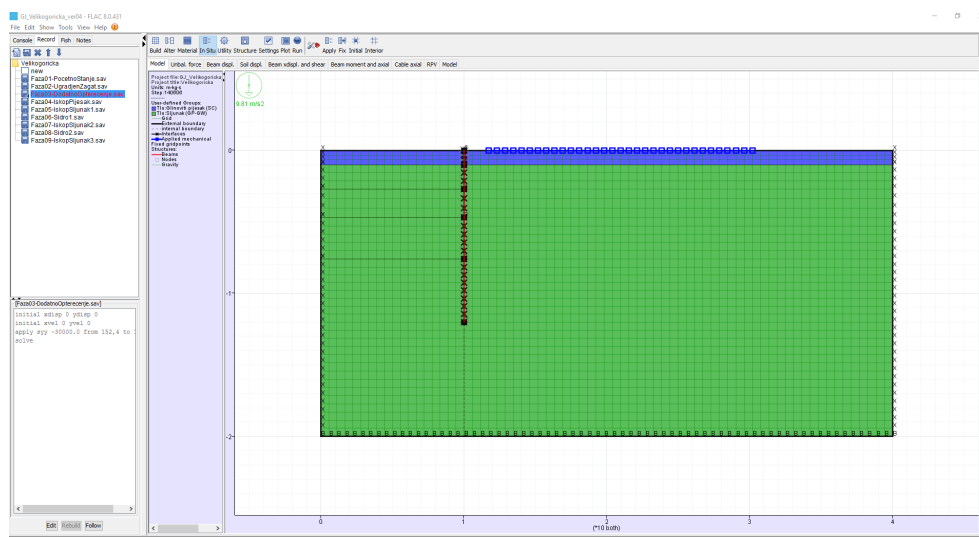
Na slici 4-6 prikazani su dodijeljeni parametri u skladu s zadanom vrstom čeličnih talpi.



Slika 4-6 Unos parametara čeličnog žmurja

4.3.1.3. 3.faza: Zadavanje dodatnog opterećenja

U trećoj fazi proračuna slijedi unos vrijednosti dodatnog opterećenja na površini tla neposredno uz građevnu jamu. Dodatno opterećenje predstavlja mogući promet u neposrednoj blizini, te radne strojeve pri iskopu građevne jame. Odabrana je prosječna vrijednost u iznosu od 30 kN/m², tj. 30000 Pa.

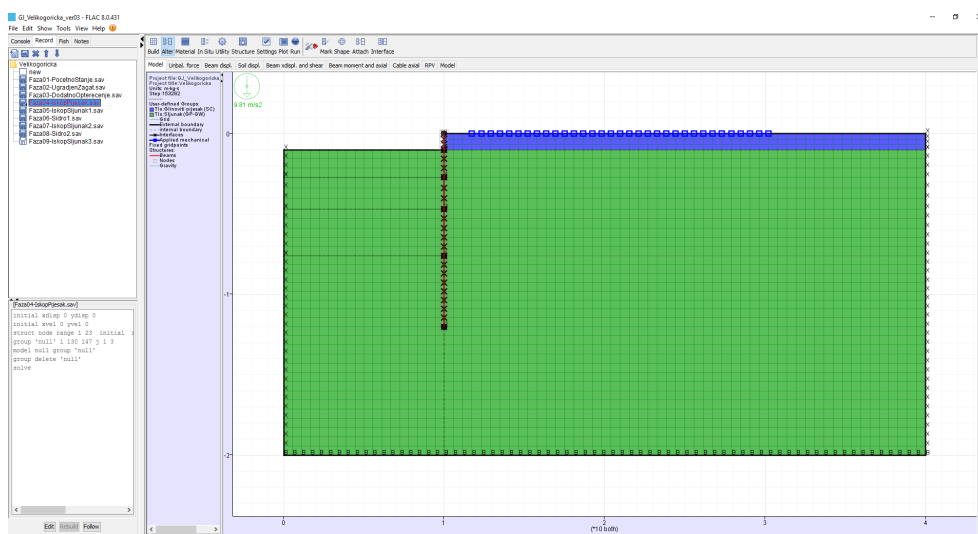


Slika 4-7 Treća faza modeliranja

Na slici 4-7 prikazan je završeni model u trećoj fazi proračuna. Dodatno opterećenje u FLAC-u je prikazano plavim kvadratima na njemu predodređenom mjestu, u ovom slučaju rasprostranjeno po površini terena s desne strane zagatne stijene.

4.3.1.4. 4. faza: Iskop sloja pijeska

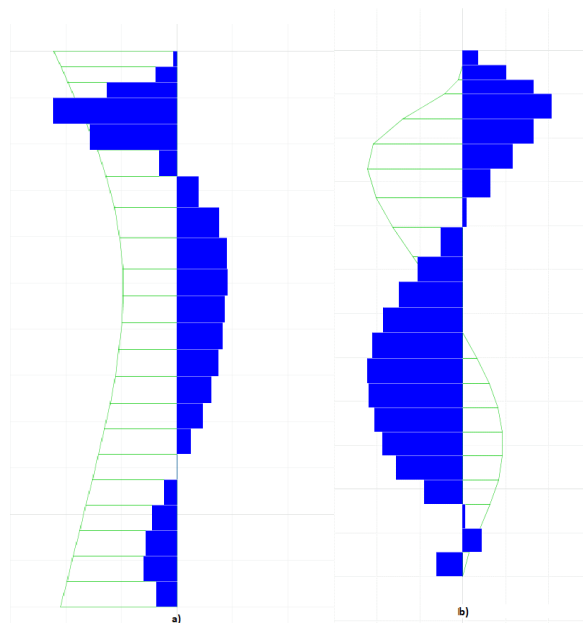
U četvrtoj fazi računski se obrađuje iskop sloja pijeska, odnosno prvog sloja tla građevne jame. Odabire se zadani dio modela unutar granica građevne jame, te se početne vrijednosti brzine i pomaka stavljaju na nulu. U nastavku se ranije zadane vrijednosti materijala za sloj glinovitog dijela u predmetnom segmentu brišu, te se time dobiva simulacija otkopanog prvog sloja građevne jame.



Slika 4-8 Četvrta faza modeliranja

Na slici 4-8 prikaz je geotehničkog modela nakon četvrte faze modeliranja, odnosno u stvarnosti prve faze iskopa u građevnoj jami.

S obzirom na to da s ovom fazom započinje cjelokupni otkop građevne jame, tijekom svih daljnjih faza praćeni su rezultati pomaka zagata po apscisi, posmična i normalna naprezanja zagata, te moment savijanja istog. Na slici 4-9 dijagramima su prikazani potrebni rezultati proračuna nakon otkopa sloja glinovitog pijeska.



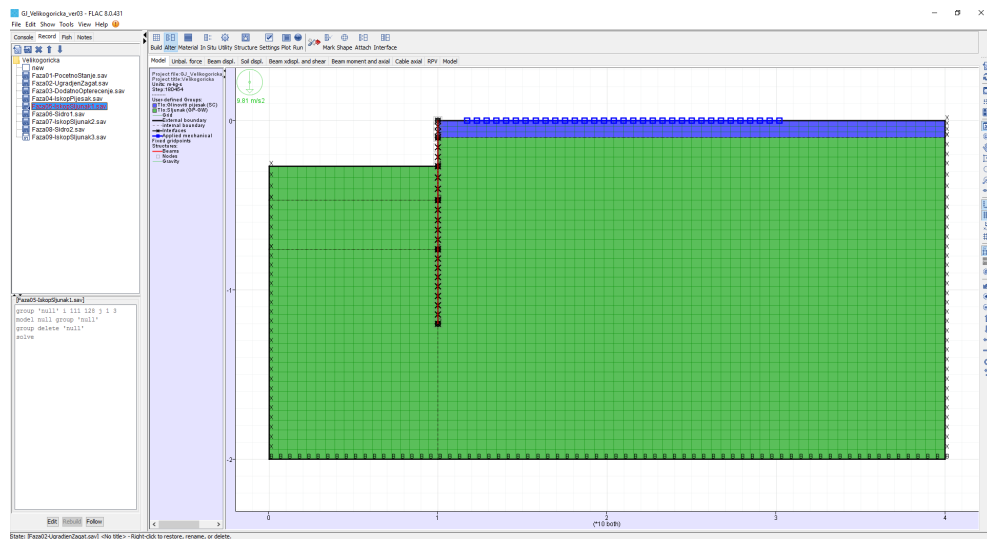
Slika 4-9 Rezultati proračuna nakon četvrte faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

Na dijagramu pod slovom a) prikazani su horizontalni pomak i unutarnja posmična sila zagatne stijene. Horizontalni pomak naznačen je transparentno zelenom bojom, dok je plavom bojom naznačeno kretanje vrijednosti posmične sile u zagatu. Vidljivo je da su vrijednosti pomaka u potpunosti na negativnoj strani osi dijagrama, te maksimalna vrijednost u_x iznosi -0,13 cm. Ekvivalentne vrijednosti pomaka vidljive su pri vrhu i dnu zagata. Posmična sila pozitivnih je i negativnih vrijednosti u odnosu na os. Međutim, maksimalna vrijednost posmične sile Q_{\max} nalazi se pri vrhu zagata gdje je otkopan sloj pijeska i iznosi -17,34 kN.

Pod slovom b) na dijagramu prikazani su unutarnja normalna sila, te moment savijanja zagata. Moment savijanja prikazan je transparentnom zelenom bojom, dok plava boja naznačava vrijednosti normalne sile. Normalna sila raspodijeljena je duž osi, od vrha u pozitivnim vrijednostima u odnosu na os, čemu slijede negativne vrijednosti. Maksimalna vrijednost normalne sile N_{\max} vidljiva je pri sredini dijagrama, te iznosi -15,57 kN. Maksimalni moment savijanja u zagatu M_{\max} s lijeve je strane ordinate dijagrama, te iznosi -22,58 kNm.

4.3.1.5. 5. faza: Iskop sloja šljunka do prvog reda geotehničkih sidara

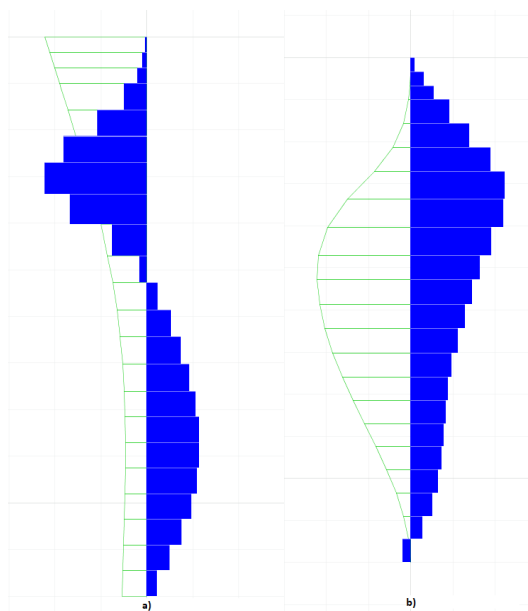
Peta faza proračuna iskop je sloja srednje do dobro građiranog šljunka do nivoa prvog reda geotehničkih sidara.



Slika 4-10 Peta faza modeliranja

Na slici 4-10 prikazan je model nakon otkopa prvog sloja šljunka. Postupak je u računskom programu isti je kao i u četvrtoj fazi. Prethodno zadane vrijednosti materijala tla zadanom segmentu modela stavljaju se na nulu te se time dobiva praznina u modelu, čime je simuliran otkop potrebnog sloja unutar građevne jame.

Otkopom drugog sloja bez upotrebe sidara značajan je utjecaj na rezultate proračuna unutarnjih sila i pomaka u zagatu. Rezultati nakon proračuna prikazani su na slici 4-11.

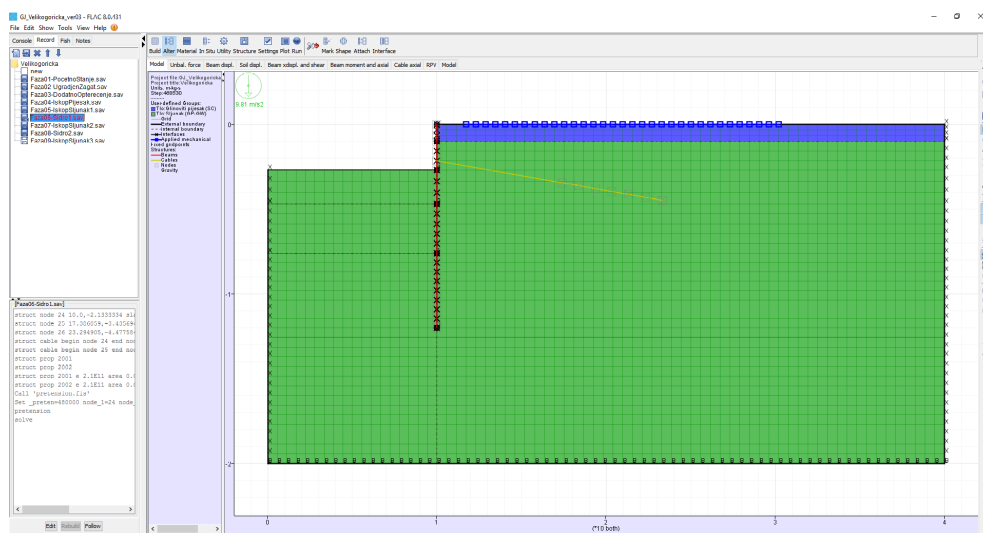


Slika 4-11 Rezultati proračuna nakon pete faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

U odnosu na rezultate četvrte faze proračuna, utjecaj tla iza zagata vidljivo je uvećan iskopom prvog sloja šljunka. Vrijednost horizontalnog pomaka raste pri vrhu zagata, te maksimalna vrijednost nakon pete faze proračuna iznosi -0,85 cm. Unutarnja posmična sila u zagatu raspoređena je duž osi, međutim maksimalna vrijednost uočena je u dijelu gdje je otkopan sloj materijala te iznosi -51,69 kN. Na dijagramu na slici 4-11 pod b) vidljivo je da je unutarnja normalna sila pretežno pozitivnog predznaka, te iznosi 55,38 kN, dok je moment savijanja sada isključivo negativnog predznaka i ima maksimalnu vrijednost -121,30 kNm.

4.3.1.6. 6. faza: Ugradnja prvog reda geotehničkih sidara

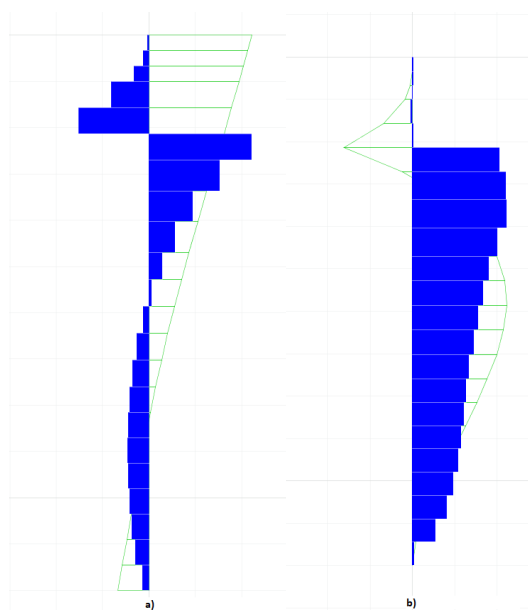
Kako je ranije navedeno, s daljnjim otkopom građevne jame ne nastavlja se dok se ne ugradi red sidara te dok sidra nisu u potpunoj funkciji. U stvarnosti se sidra ugrađuju 50 cm iznad novootkopane površine unutar građevne jame. U FLAC-u je odabrano postaviti vrh sidra jedan mrežni element iznad novog simuliranog dna građevne jame. Na slici 4-12 prikazan je model s ugrađenim prvim redom geotehničkih sidara.



Slika 4-12 Šesta faza modeliranja

Sidra se ugrađuju pod nagibom od 10° od horizontalnog pravca. S obzirom na to da su sidra dugačka 13,50 metara od čega 6,00 metara uzima sidrišna dionica, sidra se u FLAC unose u dva segmenta. Prvi segment iznosi 7,50 metara, te se drugi nadodaje na isti u vrijednosti 6,00 metara. Prvi segment naznačava se s C_1 te mu se pridodaju obilježja čelika. Drugi segment predstavlja injektirano čelično sidro, te mu se u skladu s time pridodaju njegova obilježja, te ga se imenuje s C_2 . Segmentu C_1 potrebno je potom pridodati silu prednapinjanja u vrijednosti 480 kN.

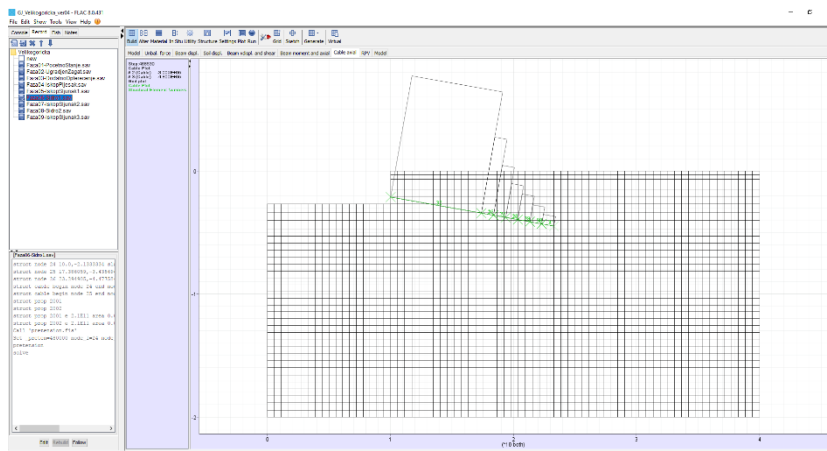
Simulacijom ugradnje geotehničkih sidara u računalnom programu znatno se utječe na rezultate. Dobivene rezultantne vrijednosti proračuna sila i pomaka zagata prikazane su na slici 4-13. Prijenos između slobodnog dijela zagata pri vrhu i mjesta ugradnje geotehničkog sidra prikazuje značajan skok iz negativnog u pozitivan predznak unutarnje posmične sile ($Q_{\max}=237,00$ kN), te aproksimativne nule u vrijednost pozitivnog predznaka za unutarnju normalnu silu ($N_{\max}=96,06$ kN). Promatrajući vrijednost pomaka u ovoj fazi u odnosu na prethodne faze, vidljivo je da nakon ugradnje geotehničkih sidara zagatna stijena ima tendenciju pomaka od otkopane građevne jame.



Slika 4-13 Rezultati proračuna nakon šeste faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

U prijašnjim fazama pomak po osi x bio je negativnog predznaka, što se ugradnjom geotehničkih sidara mijenja, te se dobiva maksimalni pomak po osi x $u_x=2,59$ cm. Moment savijanja zagatne stijene najbolje nam prikazuje utjecaj ugradnje sidara. Dijagram momenta savijanja u petoj fazi bio je isključivo negativnog predznaka zbog tendencije zagata savijanju u slobodan prostor. Međutim zatezanjem pomoću sidara a ostavljanjem dna zagata slobodnim, vidljiva je točka infleksije krivulje momenta savijanja u točki gdje je sidro ugrađeno. Maksimalni moment savijanja iznosi 214,90 kNm.

Osim rezultata sila u zagatu, proračunom su dobivene vrijednosti unutrašnje aksijalne sile geotehničkih sidara. Rezultati su prikazani dijagramom na slici 4-14.

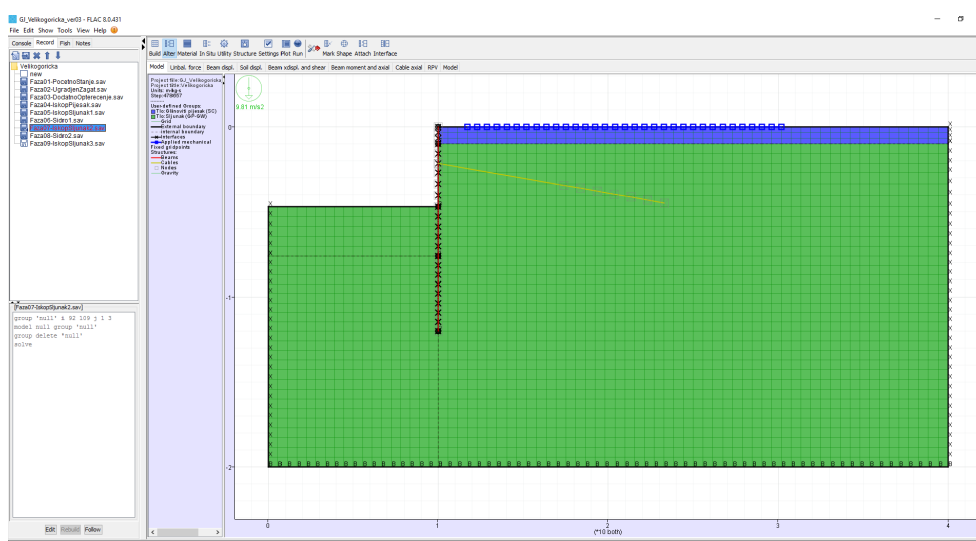


Slika 4-14 Aksijalna sila u sidru

Kako je ranije navedeno, segmentu C_1 dodijeljuje se sila prednapinjanja od 480 kN. Vrijednosti sile dobivene proračunom padaju od glave sidra prema sidrišnoj dionici. Maksimalna sila zatege jednaka je unesenoj vrijednosti prednapinjanja od -480 kN.

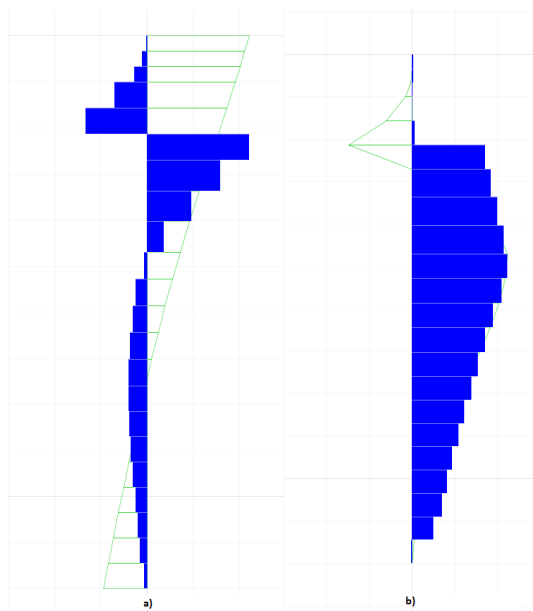
4.3.1.7. 7. faza: Iskop sloja šljunka do drugog reda geotehničkih sidara

Nakon ugradnje prvog reda geotehničkih sidara, nastavlja se s otkopom građevne jame. U ovoj fazi otkopava se drugi sloj šljunka, odnosno sloje između dva reda geotehničkih sidara. Potrebno je otkopati do dubine koja će biti pola metra ispod glava geotehničkih sidara. Na slici 4-15 prikazan je model tla u FLAC-u nakon završetka sedme faze proračuna.



Slika 4-15 Sedma faza modeliranja

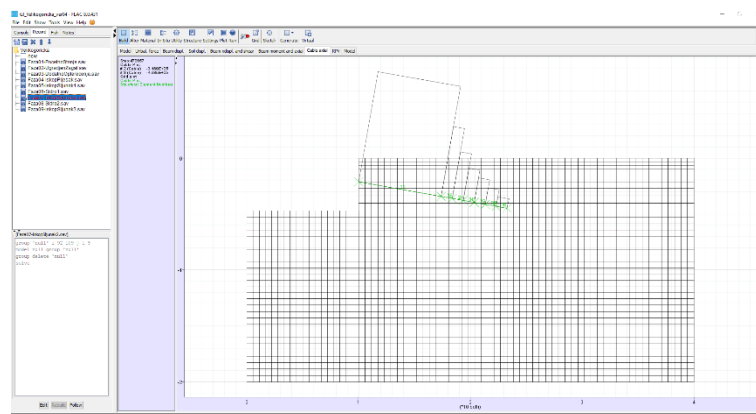
Postupak u FLAC-u isti je kao i u četvrtoj i petoj fazi modeliranja. Početno dodijeljeni parametri tla stavljaju se u nulu za zadani segment modela. Nakon simuliranog otkopa, potrebno je ponovno promotriti dijagrame unutarnjih sila dobivene proračunom. Dijagrami dobiveni proračunom prikazani su slikom 4-16.



Slika 4-16 Rezultati proračuna nakon sedme faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

Iako vizualno nema prevelike promjene između šeste i sedme faze, vrijednosti unutarnjih sila zagata su porasle otkopom novog sloja šljunka. Maksimalni pomak u_x nakon sedme faze proračuna jednak je 2,32 cm, unutarnja posmična sila porasla je na 261,70 kN, dok unutarnja normalna sila zagata iznosi 124,20 kN. S obzirom na to da je zagat usidren i dalje jednim redom geotehničkih sidara, dok je dno sidra slobodno, nema značajne promjene u dijagramu momenata savijanja, te je novi maksimalni iznos $M_{\max}=226,50$ kNm.

Iskopom novog sloja tla unutar građevne jame, osim unutarnjih sila zagatne stijene, povećavaju se i unutarnje sile geotehničkih sidara. Dijagram raspodjele unutarnje aksijalne sile prikazan je na slici 4-17.

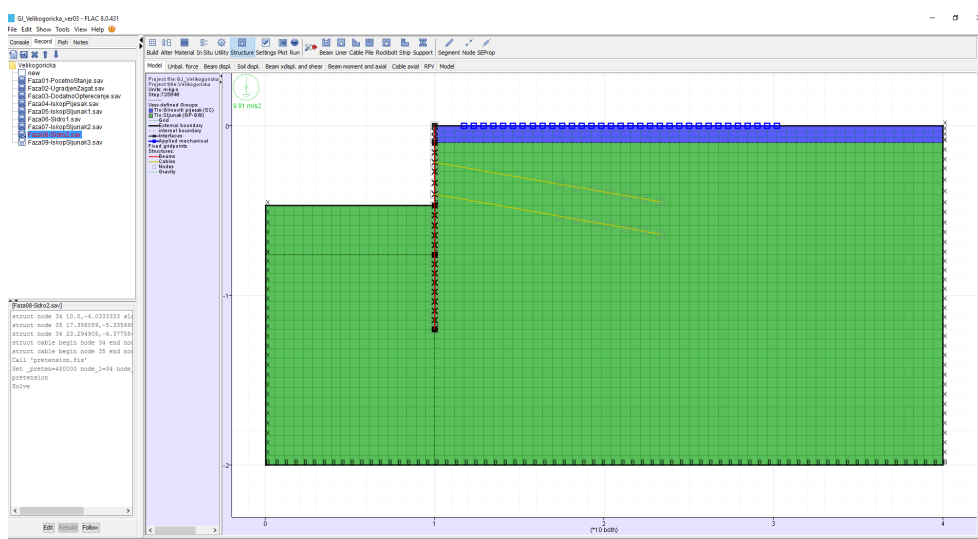


Slika 4-17 Aksijalna sila u sidru

Vrijednost unutarnje aksijalne sile sidra porasla je sa zadane sile napinjanja do maksimalne vrijednosti od -498,50 kN.

4.3.1.8. 8. faza: Ugradnja drugog reda geotehničkih sidara

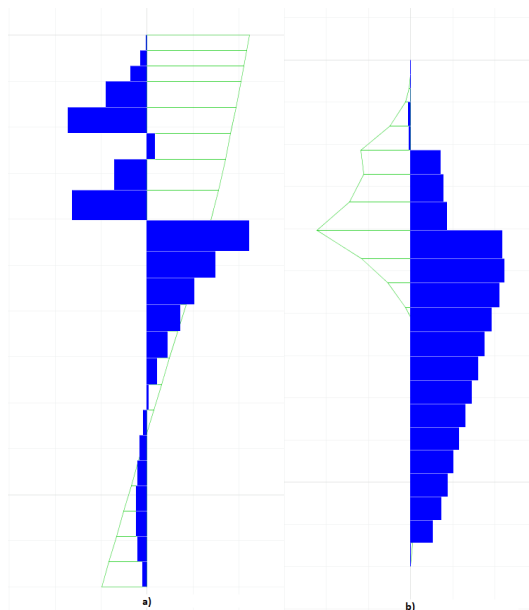
Nakon nove faze otkopa slijedi ugradnja novog reda geotehničkih sidara. Postupak i dimenzije u cijelosti prate isti u šestoj fazi modeliranja. Model na kraju osme faze proračuna prikazan je na slici 4-18.



Slika 4-18 Osmu faza modeliranja

S obzirom na to da postupak izvedbe osme faze u računalnom programu prati postupak u šestoj fazi, geotehničkim sidrima potrebno je jednostavno dodijeliti već unesene parametre segmenata C1 za čelični, te C2 za injektirani dio sidra.

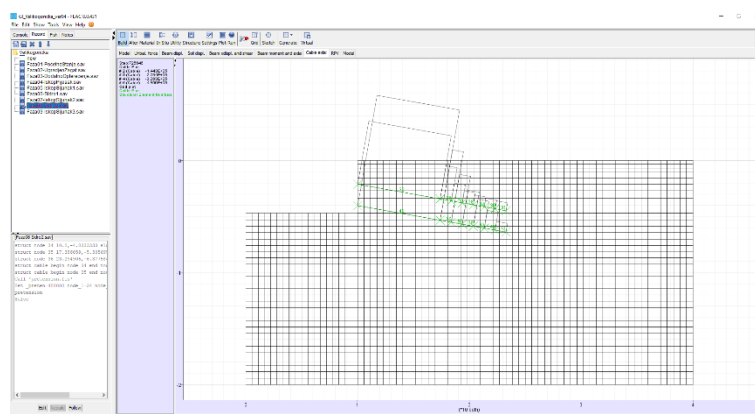
U nastavku su prikazani dijagrami unutarnjih sila (slika 4-19) dobiveni proračunom osme faze projekta.



Slika 4-19 Rezultati proračuna nakon osme faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

Vrijednost maksimalnog pomaka ostala je gotovo jednaka kao u prethodnoj fazi, iznosi 2,34 cm. Vrijednost unutarnje posmične sile iznosi 221,50 kN, dok je N_{\max} nakon osme faze proračuna 149,90 kN. Najveća promjena vidljiva je kod dijagrama momenata savijanja. Maksimalna vrijednost negativnog je predznaka u odnosu na ordinatu te se nalazi kod glave drugog reda geotehničkih sidara. M_{\max} iznosi -310,30 kNm.

U nastavku, na slici 4-20, prikazan je dijagram unutarnjih aksijalnih sila u sidrima.

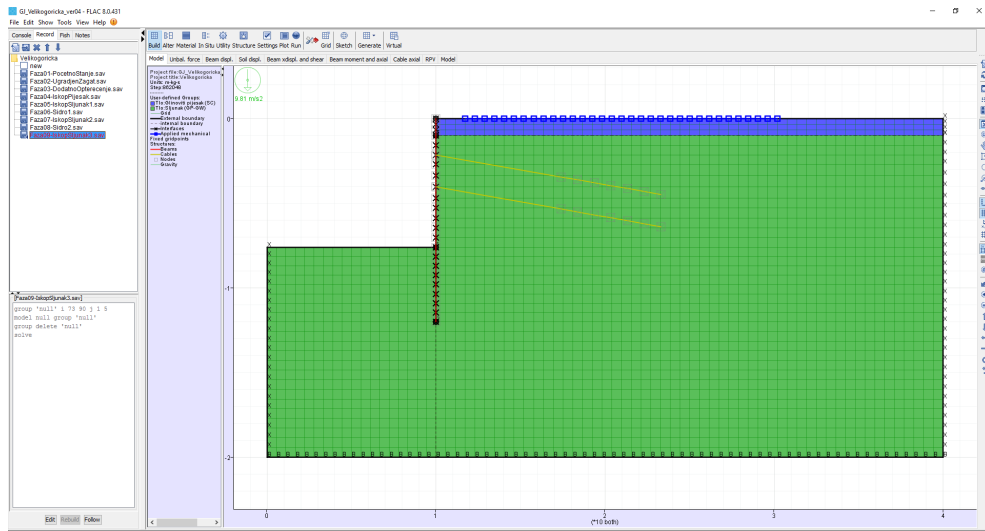


Slika 4-20 Aksijalne sile u sidrima

Stavljanjem novog reda geotehničkih sidara u funkciju, sila u prvom redu smanjuje se. Maksimalna vrijednost unutarnje aksijalne sile prvog sidra iznosi -275,40 kN. Vrijednost unutarnje aksijalne sile drugog reda sidara jednaka je početnoj unesenoj vrijednosti prednapinjanja od -480,00 kN.

4.3.1.9. 9. faza: Iskop sloja šljunka do dna građevne jame

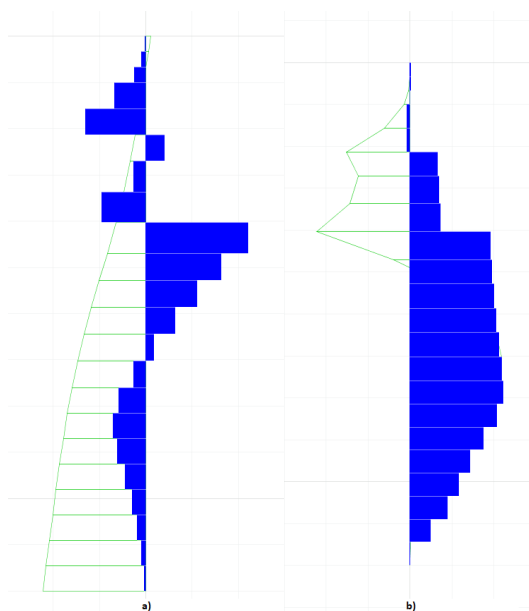
Deveta i završna faza modeliranja predmetnog objekta u FLAC-u jest iskop na dno. Početno dodijeljeni parametri tla šljunka za predodređeni segment modela stavljaju se u nulu te se na taj način u računalnom programu simulira otkopani dio unutar građevne jame.



Slika 4-21 Deveta faza modeliranja

U konačnici, na modelu (slika 4-21) su prikazani svi elementi konstrukcije, dodatno opterećenje, dva reda geotehničkih sidara, te zagat zabijen do dubine ispod površine otkopa građevne jame. Kako u stvarnosti, tako i u računalnom programu završnu točku zagata potrebno je postaviti ispod dna jame zbog značajnijeg otpora tlu iza zagata, te utjecaja podzemne vode, odnosno hidrostatskog pritiska.

Na slici 4-22 prikaz je dijagrama unutarnjih sila i pomaka zagatne stijene po završetku proračuna svih faza. Plavom bojom označene su unutrašnja posmična sila (a), te unutarnja normalna sila zagata (b). N_{\max} iznosi 168,10 kN, dok je $Q_{\max}=288,60$ kN.

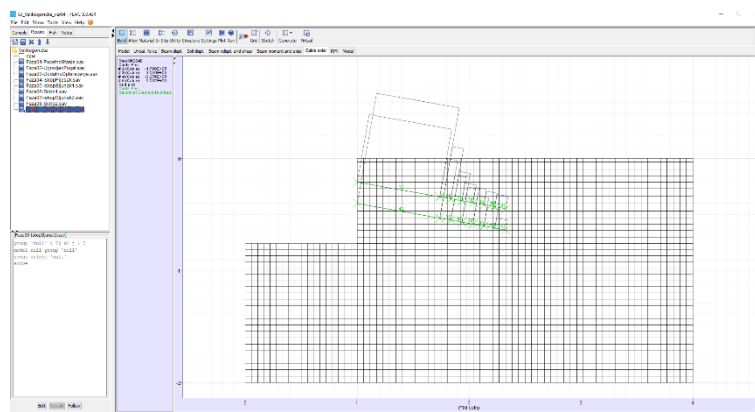


Slika 4-22 Rezultati proračuna nakon završne faze; a) horizontalni pomak i posmična sila, b) normalna sila i moment savijanja

Maksimalno unutarnje posmično naprezanje nalazi se u razini između ugradnje dva reda geotehničkih sidara, u ostalim dijelovima duž zagata vrijednosti su poprilično niže.

Na dijagramu pod slovom a) zelenim linijama prikazani su pomaci po osi x. Na kraju proračuna pomak je maksimalan u dnu zagata te iznosi -1,28 cm. Istim načinom na dijagramu pod slovom b) vidljivi su momenti savijanja. Maksimalna vrijednost momenta savijanja iznosi -233,20 kNm.

U nastavku, na slici 4-23 prikazane su konačne unutarnje aksijalne sile geotehničkih sidara. Maksimalna sila prvog reda sidara iznosi -309,40 kN, dok je najveća unutarnja sila drugog reda geotehničkih sidara u vrijednosti -505,20 kN.



Slika 4-23 Aksijalne sile u sidrima

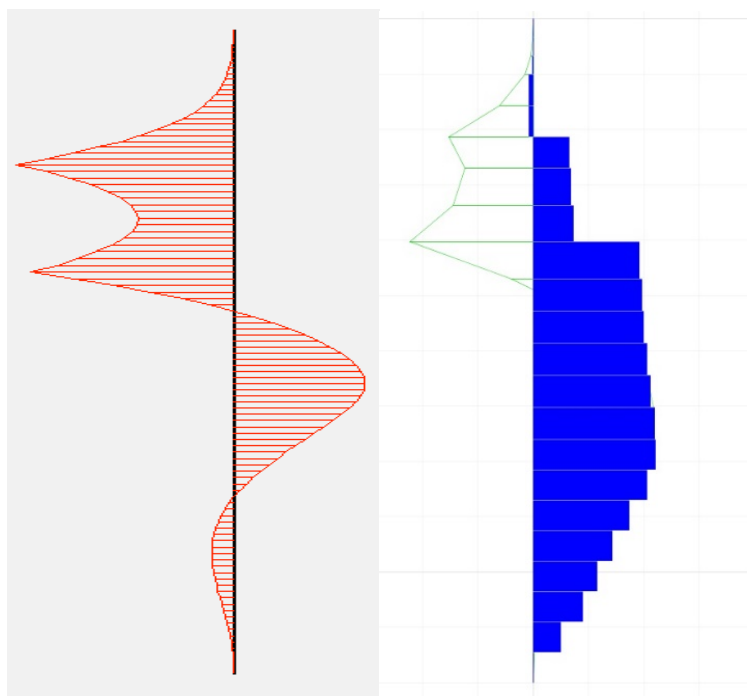
5. USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA U PLAXISU I FLAC-U

U oba programa proračun je rađen u fazama. U nastavku će biti tablično uspoređene vrijednosti pomaka po osi x, vrijednosti unutrašnjih normalnih i posmičnih sila, te moment savijanja u zagatu. Promatrane faze proračuna biti će iskop do prvog reda geotehničkih sidara, ugradnja prvog reda sidara, iskop između prvog i drugog reda sidara, ugradnja drugog, te posljednja faza, iskop do dna građevne jame. U tablici 5-1 prikazani su rezultati proračuna u Plaxisu (P) (Bošković, 2013) i FLAC-u (F).

Tablica 5-1 Tablični prikaz dobivenih unutrašnjih sila zagata

Sila	M _{max} [kNm]		Q _{max} [kN]		N _{max} [kN]		u _{max} [cm]	
	P	F	P	F	P	F	P	F
Računalni program								
Prvi iskop	-49,72	-121,30	-28,87	-51,69	16,96	55,38	-2,59	-0,80
Prvi red sidara	-79,71	214,90	-102,93	237,00	36,57	96,06	-1,62	2,59
Drugi iskop	-82,39	226,50	-103,24	261,70	68,09	124,20	-1,60	2,32
Drugi red sidara	-72,88	-310,30	116,76	221,50	104,91	149,90	-1,61	2,34
Završni iskop	-76,69	-233,20	128,71	288,60	150,37	168,10	2,24	-1,28

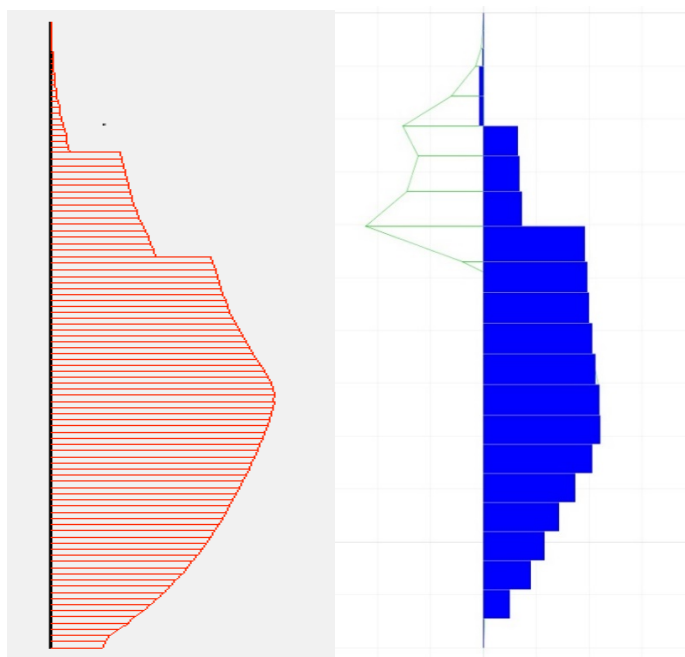
Usporedbom dobivenih rezultata u Plaxisu i FLAC-u vidljivo je da se rezultati bitno razlikuju računom s dvije različite numeričke metode. Ovdje treba istaknuti da su se modeli tla razlikovali. U Plaxis 2D korišten je Hardening Soil model a u Flac 8 2D korišten je Mohr-Coulombov model tla. Nakon završnog iskopa maksimalni moment savijanja zagata u Plaxisu iznosi -76,69 kNm, dok rezultat proračuna u FLAC-u iznosi -233,20 kNm. Međutim, ako promotrimo dijagrame momenata savijanja dobivene proračunom pomoću obje metode, možemo primijetiti vrlo sličan oblik krivulje momenata savijanja. Dijagrami su prikazani na slici 5-1.



Slika 5-1 Dijagrami momenata savijanja

Na slici 5-1 s lijeve strane prikazan je dijagram momenata savijanja dobiven proračuno s u Plaxisu. Usporedbom sa transparentnim dijelom dijagrama s desne strane, vidljivo je da je oblik krivulje savijanja dobiven pomoću oba računalna programa vrlo sličan.

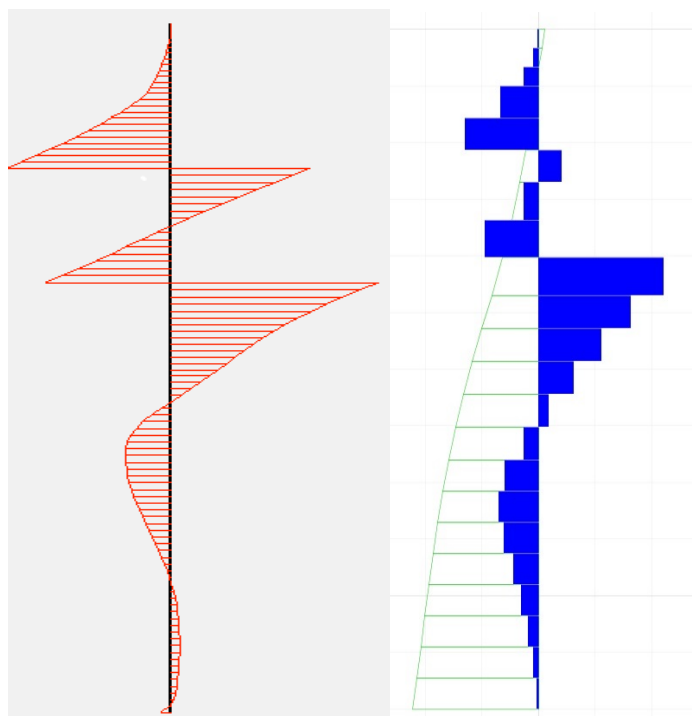
Na slici 5-2 prikazani su dijagrami unutarnje aksijalne sile zagatne stijene nakon završne faze iskopa.



Slika 5-2 Dijagrami unutarnjih aksijalnih sila zagata

Usporedbom dijagrama dobivenih pomoću Plaxisa i FLAC-a vidljivo je da su oblici krivulja vrlo slični. Također, usporedbom rezultata prikazanih u tablici 5-1, vidljivo je da su maksimalne vrijednosti vrlo bliske. Maksimalna unutarnja aksijalna sila dobivena proračunom u FLAC-u iznosi 168,10 kN, dok je vrijednost dobivena Plaxisom 150,37 kN.

Na slici 5-3 prikazani su dijagrami unutrašnjih posmičnih sila po završetku konačne faze proračuna.



Slika 5-3 Dijagrami unutaršnjih poprečnih sila zagata

Oblici krivulja dobiveni u Plaxisu i FLAC-u vrlo su slični. Međutim maksimalna vrijednost unutaršnjih poprečnih naprezanja dobivena proračunom u FLAC-u više je nego dvostruko veća od dobivene vrijednosti proračuna u Plaxisu. Dobivena maksimalna vrijednost nakon završne faze iskopa u FLAC-u iznosi 288,60 kN, dok ista dobivena proračunom u Plaxisu iznosi 128,71 kN.

U tablici 5-2 prikazani su rezultati unutrašnjih aksijalnih sila u geotehničkim sidrima. Kao u slučaju odnosa unutaršnjih sila u zagatnoj stijeni kod proračuna dvama različitim računalnim programima, bitne razlike vidljive su i kod usporedbe aksijalnih sila u sidrima.

Tablica 5-2 Tablični prikaz proračunatih unutrašnjih aksijalnih sila sidara

Sila	F _{1max} [kN]		F _{2max} [kN]	
	P	F	P	F
Prvi iskop	-	-	-	-
Prvi red sidara	480,00	480,00	-	-
Drugi iskop	497,76	498,50	-	-
Drugi red sidara	454,56	275,40	480,00	480,00
Završni iskop	460,56	309,40	505,92	505,20

Po završetku iskopa sidro F₁ preuzima silu reda veličine 460,56 kN u Plaxisu, dok sila u istom sidru dobivena proračunom u FLAC-u iznosi 309,40 kN. Međutim u sidru F₂ razliku u silama između proračuna u oba programa je neprimjetna.

6. ZAKLJUČAK

Građevne jame standardni su dio izgradnje građevnih objekata. S obzirom na potrebe izgradnje u urbanim sredinama, ozbiljnost pristupa pri izradi građevnih jama od neizmjerne je važnosti. U današnje vrijeme na odabir iskopa ne utječu samo materijali tla i podzemna voda, nego i sama okolina građevnog objekta s obzirom na uznapredovalu infrastrukturu urbanih središta.

Tehnologija izvedbe dubokih građevnih jama kroz povijest je znatno uznapredovala, te se danas u svrhu zaštite istih koriste razne vrste čeličnih platnica te armiranobetonske dijafragme.

Moderna izvedba geotehničkih projekata uključuje proračune u računskim programima prema različitim numeričkim metodama, uključujući metodu konačnih elemenata te metodu konačnih razlika. U oba programa proračun je rađen u sličnim fazama. U Plaxis 2D bili su dostupni podaci za analize pomoću Hardening Soil model tla dok je u Flac 8 2D korišten Mohr-Coulombov model tla. Razina podzemne vode tijekom mjerenja znatno je varirala, te su zadnja mjerenja pokazala da je razina podzemne vode ispod dna buduće građevne jame, što ukazuje da nije potrebno dodatno zaštititi dno građevne jame od prodiranja kao niti uključiti vodu u proračun. U slučaju porasta RPV radovi bi bili obustavljeni na određeni period vremena odnosno radove je potrebno izvesti u suhom razdoblju godine.

U radu je za primjer proračuna naprezanja i deformacija odabran presjek zaštite građevne jame sa žmurjem visine 12 m i dva reda geotehničkih sidara. Analiza naprezanja i deformacija provedena je praćenjem horizontalnih pomaka, posmične sile, normalne sile i moment savijanja u zagatu te vlačnih sila u sidrima tijekom pojedinih faza iskopa.

Proračun različitim metodama, unosom istih parametara materijala, u konačnici daje nešto različite rezultate. Može se pretpostaviti da je navedenom dobrim dijelom uzrok i upotreba različitih modela tla. Međutim, u konačnici se može zaključiti, iako se dobiveni rezultati razlikuju, stručnom i iskusnom interpretacijom sigurnost izvedbe projekta je neupitna s obzirom na velik izbor metoda i načina izvedbe u današnje vrijeme.

7. LITERATURA:

Bošković, M. (2013): *Projekt zaštite građevne jame*. Seminarski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.

Geokon Zagreb d.d. (2011): *Građevna jama velikogorička*. Geotehnički elaborat. Zagreb.

HRN EN 1997-1:2012: *Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -- 1. dio: Opća pravila*. HZN. Zagreb.

<http://www.irgo.si> (15.7.2017)

<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Home> (15.7.2017)

Itasca (2016): *Flac 8.0 Manual*.

Nonveiller, E. (1979). *Mehanika tla – temeljenje građevina*. Školska knjiga, Zagreb.

U.S. Army Corps of Engineers (1994): *Design of sheet pile walls*. Manual No. 1110-2-2504.